



TUGAS AKHIR - TE 141599

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONVERTER DC *STEP-UP*
RASIO TINGGI BERBASIS *QUADRATIC BOOST*
CONVERTER UNTUK APLIKASI *PHOTOVOLTAIC***

Muhammad Adhijaya Saputra
NRP 2211100113

Dosen Pembimbing
Dr. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng.
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TE 141599

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF HIGH RATIO DC STEP-UP
CONVERTER BASED ON QUADRATIC BOOST CONVERTER
FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATION**

Muhammad Adhijaya Saputra
NRP 2211 100 113

Advisor
Dr. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng.
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONVERTER DC
STEP-UP RASIO TINGGI BERBASIS *QUADRATIC*
BOOST CONVERTER UNTUK APLIKASI
PHOTOVOLTAIC**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember


Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

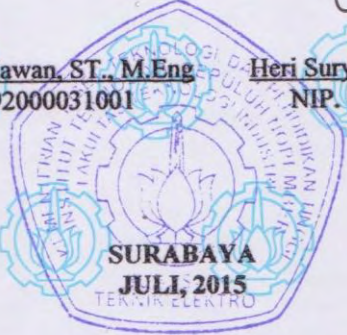
Dosen Pembimbing II


Dr. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng

NIP. 197311192000031001


Heri Suryatmojo, ST., MT., Ph.D.

NIP. 198006032006041003


**SURABAYA
JULI, 2015**

DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONVERTER DC *STEP-UP* RASIO TINGGI BERBASIS *QUADRATIC* *BOOST CONVERTER* UNTUK APLIKASI *PHOTOVOLTAIC*

Muhammad Adhijaya Saputra
2211100113

Dosen Pembimbing 1 : Dr. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng.
Dosen Pembimbing 2 : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D

ABSTRAK

Panel surya (*Photovoltaic*) memiliki karakteristik tegangan *output* yang berubah-ubah seiring berubahnya tingkat iradiasi matahari. Saat tegangan keluaran sel surya berada pada nilai yang rendah, diperlukan konverter penaik tegangan DC sebelum diubah menjadi tegangan AC. Agar proses konversi tegangan ini berjalan optimal maka diperlukan konverter DC *step-up* yang memiliki rasio tegangan tinggi, *range* tegangan input yang lebar dan juga *range* daya yang lebar. Berbagai topologi baru untuk konverter *boost* sudah dikembangkan untuk mendapatkan konverter *step-up* dengan rasio konversi tegangan yang tinggi seperti *Flyback Boost Converter*, *Cascade Boost Converter*, *Hybrid Transformer Boost Converter* dan juga *Quadratic Boost Converter*. Dalam tugas akhir ini, penulis melakukan perancangan dan implementasi *Quadratic Boost Converter* yang digunakan untuk *photovoltaic* yang terhubung ke bus DC untuk dikonversi menjadi tegangan AC. Desain dimulai dengan melakukan analisis teori, kemudian parameter komponen pada perancangan tersebut disimulasikan pada *software Power Simulator* (PSIM). Setelah itu dilakukan pembuatan *Quadratic Boost Converter* ini. Hasil pengujian alat menunjukkan konverter dapat bekerja pada rentang tegangan input 40 volt hingga 68 volt dan juga rentang daya keluaran 40 watt hingga 106,67 watt untuk tegangan keluaran konstan pada 400 volt. Dengan hasil tersebut, konverter dapat diaplikasikan untuk *photovoltaic* yang terhubung ke bus DC.

Kata Kunci : *Photovoltaic*, Konverter *Quadratic Boost*, Konverter DC Rasio Tinggi.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF HIGH RATIO DC STEP-UP CONVERTER BASED ON QUADRATIC BOOST CONVERTER FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATION

Muhammad Adhijaya Saputra
2211100113

1st Advisor : Dr. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng.
2nd Advisor : Heri Suryatomo, ST., MT., Ph.D

ABSTRACT

Photovoltaic has output voltage characteristic which fluctuate proportional to sun irradiation level. Once photovoltaic output voltage in low point, DC boost converter is required to transform the DC voltage into higher level before converted to AC voltage. To get optimal voltage conversion process, DC step-up converter must has high ratio in conversion, wide range of voltage input, and also wide power range. Several new topologies of boost converter have been developed to obtain step-up converter with high conversion such as Flyback Boost Converter, Cascade Boost Converter, Hybrid Transformer Boost Converter and Quadratic Boost Converter. This final project, perform design and implementation of Quadratic Boost Converter that applied to photovoltaic connected to DC bus to be converted from DC to AC voltage. The design began with analyzing the topology by mathematical theories, then the component parameter simulated in Power Simulator (PSIM) software and final by building the Quadratic Boost Converter prototype. The result shows the converter work in wide input voltage range (40 volt – 68 volt) and wide output power range (40 watt – 106.67 watt) with constant output voltage in 400 volt. By viewing the result, it can be said the converter can be applied to photovoltaic connected to DC bus.

Keyword: Photovoltaic, Quadratic Boost Converter, High Conversion DC Converter

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang tak pernah berhenti memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan tepat waktu. Shalawat serta salam semoga senantiasa dilimpahkan kepada Rasulullah Muhammad SAW, keluarga, sahabat, dan umat muslim yang selalu meneladani beliau.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan Sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya yang berjudul:

DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONVERTER DC *STEP-UP* RASIO TINGGI BERBASIS *QUADRATIC BOOST CONVERTER* UNTUK APLIKASI *PHOTOVOLTAIC*

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak Joyoharto, S.Pd, Ibu Nerna Eva, Kartika Vijayanti, Ilmi Dian Asrini dan Ahmad Nova Akhsani Taqwim yang tidak pernah berhenti memberikan motivasi dan doa.
2. Bapak Dr. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng dan Bapak Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran serta bimbingan.
3. Bapak Dr. Tri Arief Sardjono, ST, MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro ITS serta seluruh dosen Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu selama proses perkuliahan.
4. Teman-teman asisten laboratorium Konversi Energi Listrik yang telah banyak membantu dalam proses pengerjaan Tugas Akhir ini.
5. Teman-teman satu angkatan 2011 jurusan Teknik Elektro ITS.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih memiliki banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan masukan sangat diharapkan untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi pembaca dan masyarakat pada umumnya.

Surabaya, Mei 2015

Penulis

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Metodologi Penelitian	2
1.6 Sistematika Laporan	3
1.7 Relevansi	3

BAB II PHOTOVOLTAIC DAN KONVERTER QUADRATIC BOOST

2.1 <i>Photovoltaic</i>	5
2.1.1 Model Sel Photovoltaic	5
2.1.2 Karakteristik I-V PV	7
2.1.3 <i>PV Array</i>	9
2.2 Konverter <i>Boost</i>	9
2.3 Konverter <i>Quadratic Boost</i>	11
2.3.1 Analisis saat sakelar tertutup	11
2.3.2 Analisis saat sakelar terbuka	13
2.3.3 Perhitungan Parameter Komponen Rangkaian	15
2.3.4 Stress Tegangan pada <i>Switch</i> dan Dioda	18

BAB III PERANCANGAN SIMULASI DAN IMPLEMENTASI SISTEM

3.1 Skema Sistem Konverter secara Keseluruhan	21
3.2 Penentuan Parameter Komponen Rangkaian	22
3.3 Penentuan Parameter Rangkaian Konverter	23
3.1.1 Penentuan nilai Induktor L_1 dan L_2	23
3.1.2 Penentuan nilai Kapasitor C_1 dan C_2	25

3.4	Simulasi Kinerja Rangkaian Konverter	26
3.2.1	Simulasi Kondisi Tunak.....	26
3.2.2	Simulasi Kerja Dinamis Konverter	30
3.5	Implementasi Rangkaian Konverter.....	34

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS PERFORMA *QUADRATIC BOOST CONVERTER*

4.1	Pengujian <i>Steady State</i> Konverter.....	39
4.1.1	Pengujian Gelombang	39
4.1.2	Pengujian Rasio Konversi	44
4.1.3	Pengujian dan Efisiensi Kerja Konverter	45
4.2	Pengujian Respon Dinamik Konverter.....	46
4.2.1	Perubahan Tegangan Masukan	47
4.2.2	Perubahan Arus Keluaran	47

BAB V PENUTUP

5.1	Kesimpulan	49
5.2	Saran	49

DAFTAR PUSTAKA	51
-----------------------------	-----------

LAMPIRAN	53
-----------------------	-----------

RIWAYAT HIDUP.....	57
---------------------------	-----------

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Parameter Kontrol menggunakan proses reaction curve	32
Tabel 3.2	Spesifikasi Komponen Rangkaian Utama Konverter	37
Tabel 4.1	Perbandingan nilai ripple arus induktor 1 dan 2 pada perhitungan dan implementasi alat.....	43
Tabel 4.2	Perbandingan nilai ripple tegangan kapasitor 1 dan 2 pada perhitungan, simulasi dan implementasi alat.....	44

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Rangkaian Ekuivalen Sederhana Sel Surya.....	6
Gambar 2.2	Rangkaian Ekuivalen Detail Sel Surya	7
Gambar 2.3	Kurva karakteristik Arus – Tegangan sejumlah Sel surya yang tersusun seri.....	8
Gambar 2.4	Rangkaian Konverter <i>Boost</i>	9
Gambar 2.5	Rangkaian Konverter <i>Quadratic Boost</i>	11
Gambar 2.6	Mode operasi saat sakelar tertutup (t_{on}).....	12
Gambar 2.7	Bentuk gelombang tegangan induktor 1 dalam satu periode (a), bentuk gelombang arus induktor 1 saat sakelar tertutup (b)	12
Gambar 2.8	Bentuk gelombang tegangan induktor 2 dalam satu periode (a), bentuk gelombang arus induktor 2 saat sakelar tertutup (b)	13
Gambar 2.9	Mode operasi saat sakelar terbuka (t_{off})	14
Gambar 2.10	Tegangan drain-source MOSFET	18
Gambar 3.1	Skema Sistem Konverter keseluruhan	21
Gambar 3.2	Nameplate Modul Panel Surya yang digunakan sebagai input konverter.....	22
Gambar 3.3	Rangkaian Simulasi Steady State Konverter.....	27
Gambar 3.4	Gelombang output simulasi rangkaian PWM.....	28
Gambar 3.5	Gelombang arus Induktor 1 dan induktor 2	29
Gambar 3.6	Gelombang arus Kapasitor 1 dan Kapasitor 2.....	30
Gambar 3.7	Stress tegangan pada switch dan dioda	30
Gambar 3.8	Respon Tegangan Keluaran terhadap perubahan tegangan masukan tanpa controller.....	31
Gambar 3.9	Perancangan pembangkit sinyal PWM dan controller duty cycle dengan menggunakan controller PI	32
Gambar 3.10	Rangkaian Simulasi Kerja Dinamis Konverter.....	33
Gambar 3.11	Respon perubahan tegangan keluaran terhadap perubahan tegangan input.....	33
Gambar 3.12	Respon perubahan tegangan keluaran terhadap perubahan arus output.....	34
Gambar 3.13	Perancangan Implementasi secara keseluruhan	35
Gambar 3.14	Implementasi Alat secara keseluruhan.....	37

Gambar 4.1	Amplitude Gelombang PWM Mikrokontroller dan tegangan Drain-Source MOSFET (a), waktu ON PWM dan sakelar (b)	40
Gambar 4.2	Gelombang arus induktor 1 (a), gelombang arus induktor 2 (b) saat tegangan keluaran 400 V dan daya 106.67 watt	42
Gambar 4.3	Gelombang tegangan kapasitor 1 (a), gelombang tegangan kapasitor 2 (b) saat tegangan keluaran 400 V dan tegangan input 40 V.....	44
Gambar 4.4	Kurva rasio quadratic boost converter secara perhitungan teori dan hasil pengujian implementasi alat.....	45
Gambar 4.5	Kurva Efisiensi Quadratic Boost Converter pada tegangan input 40 V, 50 V dan 60 V untuk daya keluaran yang berbeda	46
Gambar 4.6	Respon tegangan keluaran untuk perubahan tegangan input.....	47
Gambar 4.7	Respon tegangan keluaran untuk perubahan arus keluaran.....	48

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Panel surya (*Photovoltaic*) memiliki karakteristik tegangan dan daya keluaran yang berubah-ubah seiring berubahnya tingkat iradiasi yang diserap oleh sel surya. Sumber energi dengan level tegangan DC rendah, memerlukan *step-up converter* untuk menaikkan tegangan sebelum dikonversikan menjadi tegangan AC [1]. Konverter DC yang paling banyak digunakan untuk aplikasi tersebut adalah konverter *boost*. Dengan tegangan DC keluaran panel surya yang berubah-ubah, konverter ini harus dapat beroperasi pada rasio konversi tegangan yang tinggi. Namun, untuk mendapatkan rasio konversi tegangan yang tinggi, konverter *boost* ini membutuhkan *duty cycle* yang sangat tinggi (mendekati satu). Konverter yang beroperasi pada *duty cycle* yang tinggi akan menimbulkan berbagai permasalahan seperti penurunan efisiensi dan *electromagnetic interference* (EMI) [2].

Berbagai topologi baru untuk konverter *boost* sudah dikembangkan untuk mendapatkan konverter *step-up* dengan rasio konversi tegangan yang tinggi, seperti konverter *boost* dengan *Coupled-Inductor*. Namun konverter jenis ini memiliki *leakage energy* yang menyebabkan timbulnya *voltage stress* dan juga tingkat *Electromagnetic Interference* (EMI) yang tinggi [3]. Jenis topologi lain untuk konverter *boost* rasio tinggi adalah *Two Cascade Boost Converter*. Namun, karena topologi ini menggunakan dua Sakelar, maka efisiensi dari konverter tersebut menjadi berkurang. Untuk mendapatkan konverter *step-up* rasio tinggi dengan efisiensi yang tinggi serta EMI yang rendah, maka harus digunakan konverter *boost* dengan sakelar tunggal. Untuk keperluan ini, maka dikembangkan jenis topologi konverter *boost* yang baru dimana hanya memerlukan satu sakelar dan tiga dioda. konverter ini memiliki rasio konversi sebagai fungsi kuadrat sehingga disebut dengan *Quadratic Boost Converter* [2].

Di dalam tugas akhir ini akan dirancang dan diimplementasikan *Quadratic Boost Converter* yang memiliki karakteristik dapat menaikkan tegangan DC dengan rasio konversi yang tinggi. Konverter *boost* jenis ini memiliki kelebihan *duty cycle* yang lebih kecil untuk rasio konversi tegangan yang sama. Sehingga efisiensi penyaluran daya pun lebih tinggi.

1.2 Perumusan Masalah

Konverter hasil implementasi harus dapat mencapai tegangan keluaran sebesar 400 volt untuk tegangan masukan minimal hingga maksimal yang merupakan rentang tegangan keluaran panel surya. Selain itu, konverter juga harus dapat mempertahankan tegangan keluaran konstan untuk tegangan masukan yang berubah-ubah maupun untuk arus keluaran yang berubah-ubah sehingga konverter dapat diaplikasikan pada sistem *photovoltaic*.

1.3 Batasan Masalah

Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, permasalahan dibatasi sebagai berikut :

1. Perancangan implementasi alat disesuaikan dengan komponen-komponen yang ada dipasaran serta peralatan pendukung yang tersedia di laboratorium.
2. Implementasi menggunakan sumber tegangan *input* yang tetap dan beban menggunakan resistor
3. Pembahasan kontrol *close loop* konverter sebatas pada kemampuan controller dalam menjaga tegangan keluaran konstan
4. Semua analisis dan perhitungan dilakukan pada keadaan tunak dan semua komponen dianggap ideal

1.4 Tujuan Penelitian

Tugas akhir ini bertujuan sebagai berikut :

1. Merancang dan membuat implementasi alat konverter *Quadratic Boost* yang dapat digunakan pada sistem *Photovoltaic*.
2. Mengetahui efisiensi dari implementasi alat untuk beban rendah hingga beban maksimum

1.5 Metodologi Penelitian

Dalam mengerjakan tugas akhir ini, pertama kali penulis melakukan perancangan konverter dengan melakukan simulasi rangkaian pada *software* PSIM. Kemudian dilakukan implementasi alat, pengambilan data dan penulisan laporan.

Perancangan alat pertama kali dilakukan dengan menentukan konfigurasi dan kapasitas panel surya yang akan digunakan sebagai sumber. Kemudian melalui perhitungan teoritis, ditentukan nilai parameter setiap komponen yang tepat agar didapatkan keluaran sesuai dengan yang ditentukan. Rangkaian konverter dengan nilai komponen yang sudah sesuai disimulasikan dengan *software* PSIM.

Setelah simulasi konverter memberikan hasil yang sesuai, maka dilakukan implementasi alat sesuai dengan perancangan yang sudah dilakukan. Kemudian dilakukan pengujian performa alat hasil implementasi melalui pengukuran sinyal dan nilai keluaran menggunakan Osiloskop dan peralatan pendukung lainnya. Pengukuran tersebut meliputi arus pada kedua induktor, tegangan pada kapasitor, nilai stress tegangan pada *switch* dan dioda.

1.6 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir ini terbagi atas lima bagian dan masing-masing bab akan terurai sebagai berikut:

1. BAB 1 merupakan pendahuluan yang berisi penjelasan tentang latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi tugas akhir ini.
2. BAB 2 berisikan teori penunjang yang membahas tentang *photovoltaic*, konverter *Boost*, konverter *quadratic boost*, Modul Arduino Mega 2560 dan IC TLP 250.
3. BAB 3 berisi tentang uraian perancangan simulasi dan implementasi sistem untuk daya 106,67 watt yang akan diimplementasikan dan diuji di laboratorium.
4. BAB 4 berisi tentang analisis dari hasil pengujian implementasi alat konverter *quadratic boost*.
5. BAB 5 berisi tentang kesimpulan dan saran terhadap penelitian yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Dapat menjadi referensi bagi peneliti selanjutnya untuk konverter *boost* dengan rasio tegangan tinggi yang dapat bekerja pada rentang tegangan *input* yang lebar dan memiliki efisiensi yang tinggi pada semua level pembebanan.
2. Dapat menjadi referensi untuk mengembangkan pembangkit listrik yang memanfaatkan energi terbarukan seperti *photovoltaic*.
3. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil masalah yang serupa untuk dikembangkan sebagai Tugas Akhir.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 2

PHOTOVOLTAIC* DAN KONVERTER *QUADRATIC BOOST

2.1 *Photovoltaic*

Panel Surya atau biasa disebut *Photovoltaic* merupakan suatu peralatan yang tersusun atas material semikonduktor yang dapat merubah energi yang terkandung pada foton cahaya menjadi tegangan listrik dan arus [5]. Sejak awal penemuannya pada abad ke 7 hingga sekarang, *photovoltaic* telah mengalami banyak perkembangan. Mulai dari efisiensi yang hanya 2% hingga menjadi sekitar 16% untuk panel surya komersial yang ada di pasaran saat ini. Belum banyak Negara yang memanfaatkan teknologi panel surya ini untuk mencukupi kebutuhan listrik masyarakatnya. Hal itu dikarenakan biaya investasi pembangkit listrik dengan panel surya ini masih tergolong mahal dan jika dibandingkan dengan pembangkit listrik konvensional seperti pembangkit listrik tenaga uap dan pembangkit listrik tenaga air masih jauh dari segi keuntungan. Namun banyak peneliti dan ilmuwan yang memproyeksikan *photovoltaic* ini sebagai sumber energi terbarukan yang menjanjikan. Hal itu karena potensi energi matahari yang sangat besar yaitu sekitar 6000 kali dari total kebutuhan energi manusia, dan juga sifat *photovoltaic* yang tidak menimbulkan polusi memungkinkan terjaganya kelestarian lingkungan walaupun teknologi ini diterapkan secara besar-besaran.

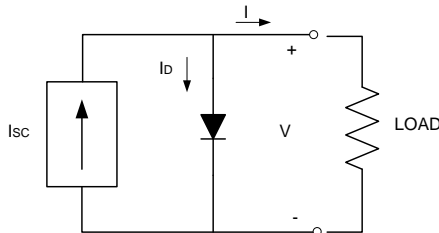
2.1.1 Model Sel *Photovoltaic*

Sel surya pada umumnya terbuat dari material semikonduktor yang berasal dari golongan IV A pada Tabel Periodik Kimia seperti Silicon dan Germanium. Selain itu juga dapat berupa kombinasi dari semikonduktor Golongan III A dan V A, seperti Galium dengan Fosfor [5]. Atau juga dapat merupakan kombinasi dari material semikonduktor golongan II A dan VI A, seperti Cadmium dengan Telurium [5].

Mekanisme transformasi energi iradiasi menjadi energi listrik dapat dijelaskan melalui prinsip-prinsip material semikonduktor. Material semikonduktor memiliki *Band Gap* yang rendah, berbeda dengan metal dan isolator. Metal tidak memiliki *Band Gap* sehingga dapat mengalirkan elektron dengan mudah. Sedangkan isolator sangat sulit atau bahkan tidak bisa mengalirkan elektron. Material

semikonduktor tidak akan mengalirkan elektron pada kondisi normal, dan akan mengalirkan elektron jika diberi suatu doping energi berupa suhu atau yang lainnya. Silikon memiliki *Band gap* yang paling kecil dibandingkan dengan material semikonduktor lainnya, sehingga material ini banyak dipilih sebagai material dasar untuk pembuatan sel surya.

Secara sederhana, rangkaian ekivalen *photovoltaic* digambarkan dengan suatu sumber arus yang di *drive* oleh suatu cahaya dan parallel dengan suatu dioda, seperti ditunjukkan pada gambar 2.1. Dua parameter penting bagi PV adalah Arus Hubung singkat dan tegangan *open circuit*.



Gambar 2.1 Rangkaian Ekivalen Sederhana Sel Surya

Maka ketika terminal PV dihubungsingkatkan, maka seluruh arus akan mengalir ke terminal dan tidak ada arus yang mengalir ke dioda sehingga $V_d = 0$. Maka dapat dituliskan persamaan untuk rangkaian sederhana diatas yaitu :

$$I = I_{sc} - I_d \quad (2.1)$$

Sedangkan menurut persamaan Shockley, karakteristik arus – tegangan pada suatu dioda p-n *junction* dapat dituliskan sebagai :

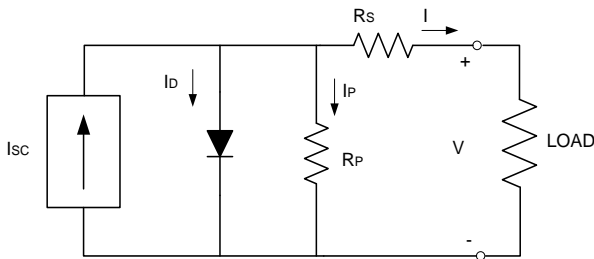
$$I_d = I_0 (e^{q \frac{V_d}{kT}} - 1) \quad (2.2)$$

I_d merupakan arus *forward diode*, V_d merupakan tegangan antara p dan n *junction*, q merupakan muatan elektron dengan nilai sebesar 1.602×10^{-19} C. konstanta k merupakan konstanta Boltzmann dengan nilai 1.381×10^{-23} J/K, serta T adalah temperatur *junction*. Maka Persamaan arus PV diatas menjadi :

$$I = I_{sc} - I_0 (e^{q \frac{V_d}{kT}} - 1) \quad (2.3)$$

Model PV sederhana ini hanya dapat digunakan jika tidak ada satu atau beberapa sel surya yang tidak mendapat penyinaran. Hal itu

dikarenakan jika pada kondisi aktual salah satu sel pada kondisi gelap atau tidak mendapat penyinaran, maka rangkaian ekivalen satu sel yang gelap tersebut menjadi *open*, sehingga membuat rangkaian keseluruhan menjadi *open*. Hal itu memunculkan logika bahwa tidak ada arus yang mengalir ke beban. Padahal dalam kenyataannya, pada kondisi tersebut PV tetap bisa mengalirkan arus ke beban. Sehingga untuk mengatasi permasalahan pemahaman ini, maka dibutuhkan pemodelan yang lebih akurat untuk sel surya. Yaitu adanya Resistansi Seri (R_s) dan Resistansi Paralel (R_p). Sehingga rangkaian ekivalen Sel surya yang lebih detail dapat dilihat pada gambar 2.2.



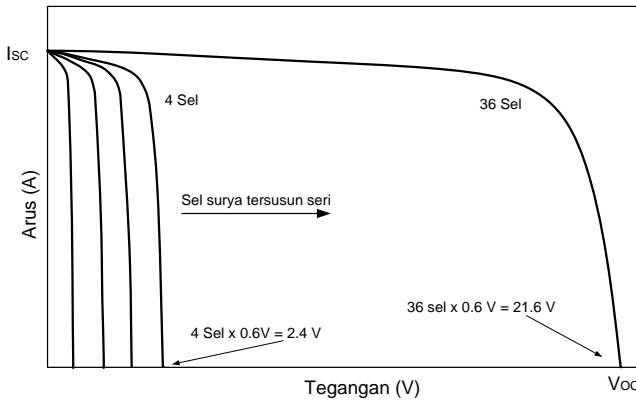
Gambar 2.2 Rangkaian Ekivalen Detail Sel Surya

Untuk sel dengan *losses* kurang dari 1%, memiliki nilai R_s kurang dari $0.01V_{oc}/I_{sc}$, sedangkan untuk nilai R_p lebih dari $100V_{oc}/I_{sc}$. Merujuk pada rangkaian ekivalen sel surya detail, maka persamaan pada sel surya berubah menjadi :

$$I = I_{SC} - I_0 \left(e^{q \frac{(V_d + I.R_s)}{kT}} - 1 \right) - \left(\frac{V_d + I.R_s}{R_p} \right) \quad (2.4)$$

2.1.2 Karakteristik I-V PV

Sebuah panel surya komersial merupakan suatu modul yang terdiri dari susunan seri atau parallel beberapa sel surya, dimana satu selnya menghasilkan tegangan sekitar 0.6 V. Untuk satu modul yang terdiri dari 36 sel surya tersusun seri, memiliki spesifikasi tegangan *open circuit* sebesar 36×0.6 V yaitu sebesar 21.6 V, dan Arus *short circuit* modul memiliki nilai sama dengan arus sel surya.



Gambar 2.3 Kurva karakteristik Arus – Tegangan sejumlah Sel surya yang tersusun seri

Jika kita memiliki satu modul panel surya yang hendak dihubungkan dengan beban, maka harus kita perhatikan terlebih dahulu karakteristik Arus-tegangan modul panel surya tersebut. Apabila terminal positif dan negatif modul panel surya tersebut kita hubungkan secara langsung, maka modul akan menghasilkan arus sebesar spesifikasi arus hubung singkatnya (I_{sc}) namun tegangan yang dihasilkan sebesar 0 V. Jika kedua terminal modul kita biarkan terbuka bebas, maka modul tersebut menghasilkan tegangan sebesar tegangan *open-circuit* nya (V_{oc}) namun tidak ada arus yang dihasilkan. Kedua keadaan tersebut dimisalkan pada kondisi STC (*Standar Test Condition*), yaitu temperature yang mengenai modul sebesar 25° Celcius dan tingkat iradiasi sebesar 1000 W/m^2 . Maka daerah operasi normal dari suatu modul panel surya adalah besar tegangan yang kurang dari nilai V_{oc} nya dan nilai arus yang kurang dari I_{sc} nya.

Jika suatu modul panel surya tidak berada pada kondisi STC, maka kurva arus-tegangan modul tersebut akan mengalami pergeseran. Perubahan iradiasi yang mengenai sel surya cenderung akan mempengaruhi nilai arus sel surya tersebut. Sehingga pergeseran kurva akan terjadi pada nilai arusnya. Sedangkan perubahan suhu yang mengenai sel surya cenderung akan mempengaruhi nilai tegangan sel surya. Sehingga pergeseran kurva akan terjadi pada sisi tegangannya. Tingkat perubahan arus dan tegangan setiap modul panel surya sebagai fungsi perubahan iradiasi dan temperature berbeda antara merek yang

satu dengan yang lainnya. Hal itu dikarenakan karakteristik fisis setiap merek modul panel surya berbeda-beda.

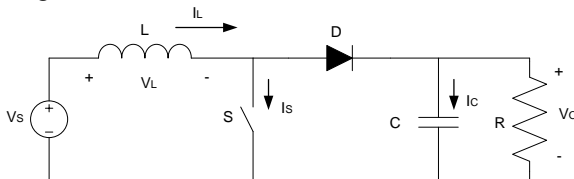
2.1.3 PV Array

Sebagaimana sel surya yang disusun seri untuk mendapatkan tegangan yang lebih besar, maka hal itu juga berlaku pada susunan beberapa modul panel surya atau biasa disebut dengan *PV array*. Sejumlah n modul panel surya yang disusun secara seri akan menghasilkan tegangan sebesar n kali tegang modul. Atau dengan kata lain karakteristik arus-tegangan akan bergeser kearah nilai tegangannya. Sedangkan jika sejumlah n modul tersebut disusun secara parallel, maka nilai arus yang dihasilkan adalah n kali dari nilai arus modul. Atau dengan kata lain kurva arus-tegangan akan bergeser kearah arus.

Dalam menyusun *PV array*, yang juga harus diperhatikan selain konfigurasi modul adalah *shading effect*. *Shading effect* adalah keadaan dimana salah satu atau beberapa sel surya tidak mendapatkan penyinaran yang cukup, sehingga menyebabkan terjadinya arus balik yang membuat nilai arus total yang dihasilkan berkurang. Selain itu *shading effect* juga dapat merusak satu atau beberapa sel surya. Sehingga diperlukan pemasangan dioda *bypass* dalam penyusunan *PV array*. Dengan menambahkan dioda *bypass* ini, drop tegangan atau arus yang terjadi akibat *shading effect* dapat dihindari.

2.2 Konverter Boost

Konverter *Boost* merupakan konverter penaik tegangan DC menggunakan metode pensaklaran dengan memanfaatkan sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*). Secara Umum konverter *Boost* terdiri dari satu induktor, satu dioda, satu saklar dan satu kapasitor dengan topologi seperti pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Rangkaian Konverter *Boost*

Pada saat sakelar konduksi, arus akan mengalir menuju induktor kemudian ke sakelar dan lalu ke *ground*. Tegangan sumber akan mentransfer energi ke induktor dan disimpan dalam bentuk medan magnet. Nilai arus yang mengalir pada induktor tersebut akan mengalami kenaikan secara linear. Pada kondisi ini pula tidak ada arus yang mengalir menuju kapasitor maupun beban. Sehingga dioda akan berada pada posisi *reverse*. Ketika sakelar pada kondisi terbuka, sumber tegangan dan induktor akan mengalirkan energi ke arah kapasitor. Sehingga dioda berada pada kondisi *forward*. Maka nilai arus pada induktor akan turun secara linear.

Nilai induktansi maupun kapasitansi dari konverter dapat dihitung melalui analisis rangkaian pada keadaan tunak [6]. Selain itu, perlu dilakukan beberapa asumsi terlebih dahulu untuk mempermudah proses analisis. Berikut asumsi yang perlu dilakukan :

1. Perubahan arus induktor kontinu (selalu positif)
2. Kapasitor *output* nilainya sangat besar, sehingga nilai tegangan *output* tetap.
3. Rangkaian beroperasi pada keadaan tunak
4. Saklar dan dioda berada pada kondisi yang ideal

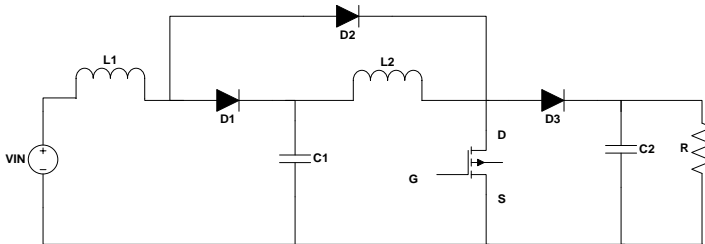
Dengan analisis kondisi saat sakelar tertutup dan saat sakelar terbuka, didapatkan persamaan rasio konversi tegangan dari konverter *Boost* adalah sebagai berikut :

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{(1-D)} \quad (2.4)$$

Untuk aplikasi *Photovoltaic*, konverter *Boost* ini kurang memiliki performa yang baik dikarenakan memiliki efisiensi yang rendah. Karakteristik PV yang menghasilkan tegangan dan daya yang berubah-ubah, membuat konverter harus mampu bekerja pada rentang tegangan input yang lebar [4]. Sedangkan untuk aplikasi *DC-Link Inverter*, maka konverter harus dapat menaikkan tegangan hingga 400 V. Untuk melakukan ini, konverter *Boost* membutuhkan *duty cycle* yang tinggi, hingga mendekati 1. Sehingga hal itu membuat performa transistor *switching* menurun dikarenakan adanya batasan frekuensi pensakelaran pada transistor [4].

2.3 Konverter *Quadratic Boost*

Konverter *Quadratic Boost* merupakan penaik tegangan DC yang memiliki persamaan rasio konversi sebagai fungsi kuadrat dari persamaan rasio dari konverter *Boost* konvensional. Konverter ini memiliki topologi seperti ditunjukkan pada gambar 2.5. konverter *Quadratic Boost* ini memiliki kualitas yang bersaing karena memiliki topologi yang sederhana dan dapat menaikkan tegangan hingga 400 volt dengan tegangan minimal 20 – 30 volt [2].



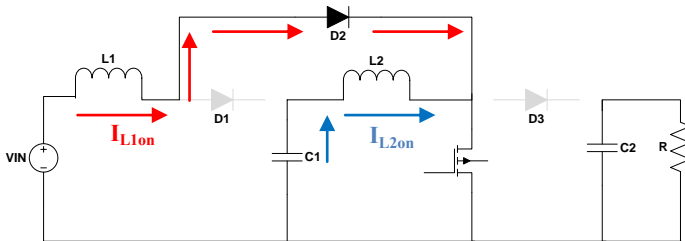
Gambar 2.5 Rangkaian Konverter *Quadratic Boost*

Konverter ini memiliki topologi yang hampir sama dengan *Cascade Boost Converter* hanya saja dilakukan modifikasi sehingga hanya memiliki satu sakelar [4]. Selain itu, konverter ini terdiri dari dua induktor, dua kapasitor dan tiga dioda sebagai sakelar pasif [4].

Quadratic Boost Converter ini memiliki rasio konversi yang tinggi sehingga cocok digunakan pada aplikasi *photovoltaic* untuk *DC-Link* yang terhubung inverter. Hal itu karena rasio teringgi dari konversi tegangan dapat tercapai sebelum efisiensi dari konverter mengalami penurunan [4]. Efisiensi konverter akan menurun jika *duty cycle* dari sakelar semakin mendekati satu.

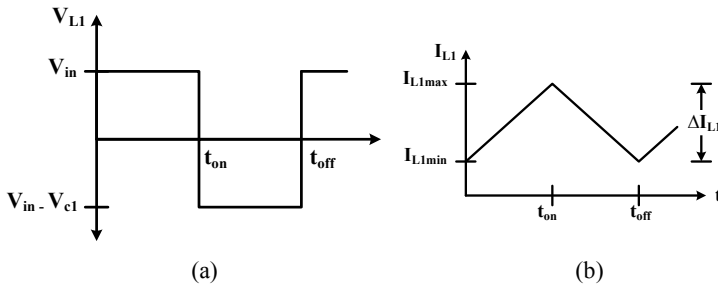
2.3.1 Analisis Saat Sakelar Tertutup

Pada kondisi tunak saat sakelar konduksi, dioda 1 berada pada kondisi *reverse* karena tegangan katoda dari dioda 1 bernilai sama dengan tegangan kapasitor 1 dan tegangan anoda bernilai sama dengan tegangan sumber, dimana tegangan kapasitor 1 bernilai lebih besar dari tegangan sumber. Begitu juga dengan dioda 3 akan berada pada kondisi *reverse* sedangkan dioda 2 akan berada pada kondisi *forward*. Sehingga rangkaian ketika sakelar tertutup menjadi seperti pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Mode operasi saat sakelar tertutup (t_{on})

Pada kondisi ini, tegangan masukan konverter dan induktor 1 membentuk satu loop tertutup sehingga besarnya tegangan induktor 1 adalah sama dengan nilai tegangan sumber dan besarnya tegangan induktor 2 adalah sama dengan nilai tegangan kapasitor 1. Induktor L_1 akan menyerap energi dari sumber. Sehingga terjadi aliran arus dari sumber ke induktor L_1 , kemudian melewati sakelar menuju *ground* atau negatif sumber. Nilai arus pada induktor 1 (I_{L1on}) akan berubah terhadap waktu secara positif, atau dengan kata lain bertambah dari nol hingga nilai tertentu, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.7.



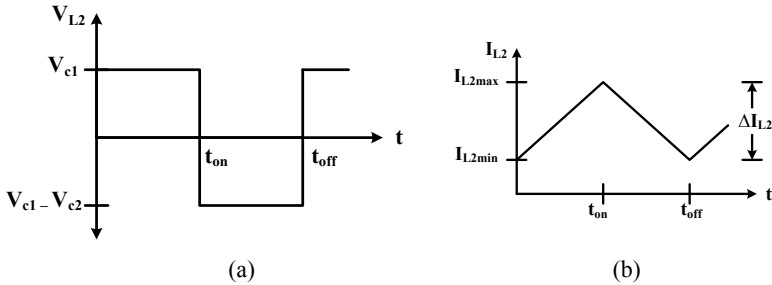
Gambar 2.7 Bentuk gelombang tegangan induktor 1 dalam satu periode (a), bentuk gelombang arus induktor 1 saat sakelar tertutup (b)

Dari gambar 2.7 dapat ditentukan persamaan – persamaan untuk menghitung nilai *ripple* arus induktor 1 (ΔI_{L1}) dan akhirnya dapat ditentukan persamaan rasio konversi dari konverter. Sehingga :

$$V_{in} = V_{L1} \quad (2.5)$$

$$L_1 \cdot \frac{\Delta i_{L1}}{\Delta t_{on}} = V_{in} \quad (2.6)$$

Pada saat yang sama, induktor L_2 menyerap energi yang tersimpan pada kapasitor C_1 . Sehingga arus induktor L_2 akan naik secara linear hingga nilai tertentu dan nilai tegangan kapasitor C_1 akan turun secara linear. Induktor mengalami proses *charging* sedangkan kapasitor mengalami proses *discharging*.



Gambar 2.8 Bentuk gelombang tegangan induktor 2 dalam satu periode (a), bentuk gelombang arus induktor 2 saat sakelar tertutup (b)

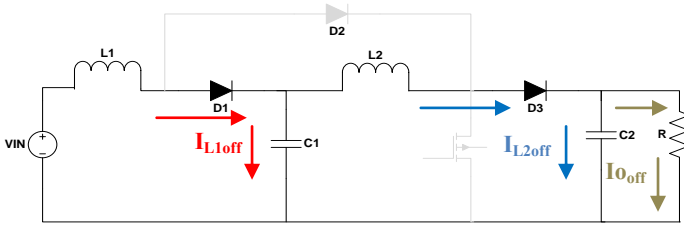
Dari gambar 2.8 diatas, dapat ditentukan persamaan – persamaan untuk menghitung nilai *ripple* induktor 2 sehingga :

$$V_{c1} = V_{L2} \quad (2.7)$$

$$L_2 \cdot \frac{\Delta i_{L2}}{\Delta t_{on}} = V_{c1} \quad (2.8)$$

2.3.2 Analisis saat sakelar terbuka

Lamanya waktu penyalan sakelar akan menentukan bentuk sinyal arus induktor dan juga mode operasi dari konverter ini. Pada kondisi *Continous Conduction Mode (CCM)*, lamanya waktu sakelar off dijaga lebih kecil dari lamanya waktu yang dibutuhkan untuk melepaskan energi yang tersimpan pada induktor hingga habis. Pada saat sakelar terbuka, dioda 2 akan berada pada kondisi *reverse bias* dikarenakan tegangan pada sisi katoda lebih besar dari tegangan pada anoda. Sedangkan dioda 1 dan dioda 3 berada pada kondisi *forward bias*. Sehingga pada selang waktu ini, rangkaian dari konverter *quadratic boost* adalah seperti pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Mode operasi saat sakelar terbuka (t_{off})

Pada kondisi ini, sumber tegangan dan induktor L_1 akan menyalurkan energi ke kapasitor C_1 [2]. Sehingga nilai arus induktor L_1 akan turun secara linear selama waktu sakelar tertutup sebagaimana dapat dilihat pada gambar 2.7 b, sedangkan nilai tegangan kapasitor C_1 akan naik secara linear. Kondisi ini digambarkan dengan urutan persamaan - persamaan berikut :

$$V_{in} + V_{L1} = V_{c1} \quad (2.9)$$

$$V_{in} + L_1 \cdot \frac{\Delta_{iL1}}{\Delta_{toff}} = V_{c1} \quad (2.10)$$

$$V_{in} + \frac{V_{in} \cdot \Delta_{ton}}{\Delta_{toff}} = V_{c1} \quad (2.11)$$

$$V_{in} \left(\frac{T}{T - \Delta_{ton}} \right) = V_{c1} \quad (2.12)$$

$$V_{in} \left(\frac{1}{1 - D} \right) = V_{c1} \quad (2.12)$$

Pada saat yang sama, kapasitor C_1 dan induktor L_2 akan menyalurkan energi yang tersimpan menuju kapasitor C_2 . Sehingga nilai arus induktor L_2 akan turun secara linear. Kondisi ini digambarkan dengan persamaan berikut :

$$V_{c1} + V_{L2} = V_{c2} \quad (2.13)$$

$$V_{c1} + L_2 \cdot \frac{\Delta_{iL2}}{\Delta_{toff}} = V_{c2} \quad (2.14)$$

$$V_{c1} + \frac{V_{c1} \cdot \Delta_{ton}}{\Delta_{toff}} = V_{c2} \quad (2.15)$$

$$V_{c1} \left(\frac{T}{T - \Delta_{ton}} \right) = V_{c2} \quad (2.16)$$

$$V_{c1} \left(\frac{1}{1-D} \right) = V_{c2} \quad (2.17)$$

$$V_{in} \left(\frac{1}{1-D} \right)^2 = V_{c2} \quad (2.18)$$

Pada kondisi ini pula kapasitor C_2 melakukan transfer energi yang tersimpan ke beban. Sehingga didapatkan besarnya tegangan keluaran dari konverter ini merupakan suatu fungsi kuadrat dari rumus rasio konversi dari konverter *Boost* konvensional. Maka dapat kita simpulkan persamaan rasio konversi dari konverter *Quadratic Boost* ini adalah sebagai berikut :

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \left(\frac{1}{1-D} \right)^2 \quad (2.19)$$

2.3.3 Perhitungan Parameter Komponen Rangkaian

Dalam menentukan nilai komponen konverter, hal pertama yang harus dipahami oleh desainer adalah mengenai pendekatan matematis nilai komponen yang dibutuhkan agar dapat menghasilkan karakteristik keluaran yang sesuai dengan yang diinginkan. Untuk konverter *Quadratic Boost* ini, terdapat empat komponen yang memerlukan pendekatan matematis dalam menentukan nilainya yaitu Induktor L_1 , Induktor L_2 , Kapasitor C_1 serta kapasitor C_2 .

Untuk mendapatkan nilai induktansi L_2 , digunakan prinsip daya output bernilai sama dengan daya input. Kemudian dikombinasikan dengan nilai variabel yang telah ditentukan sebelumnya seperti tegangan output, daya output (resistansi untuk beban resistif) dan frekuensi pensaklaran. Sehingga dihasilkan persamaan – persamaan sebagai berikut :

$$P_o = P_{in} \quad (2.20)$$

$$\frac{V_o^2}{R} = V_{c1} \cdot I_{L2} \quad (2.21)$$

$$\frac{[V_{c1}/(1-D)]^2}{R} = V_{c1} \cdot I_{L2} \quad (2.22)$$

$$I_{L2} = \frac{V_{c1}}{(1-D)^2 \cdot R} \quad (2.23)$$

Arus minimum dan maksimum induktor dapat ditentukan dengan menggunakan nilai rata-rata dan nilai perubahan arusnya dari persamaan 2.24[10].

$$I_{L2min} = I_{L2} - \frac{\Delta i}{2} \quad (2.24)$$

Kemudian dilakukan substitusi persamaan 2.23 ke dalam persamaan 2.24 sehingga menghasilkan persamaan :

$$0 = \frac{V_{c1}}{(1-D)^2} - \frac{V_{c1} \cdot \Delta_{ton}}{2 \cdot L_2} \quad (2.25)$$

$$\frac{V_{c1}}{(1-D)^2 \cdot R} = \frac{V_{c1} \cdot \Delta_{ton}}{2 \cdot L_2} \quad (2.26)$$

$$L_2 = \frac{D \cdot T \cdot (1-D)^2 \cdot R}{2} \quad (2.27)$$

$$L_2 = \frac{D \cdot (1-D)^2 \cdot R}{2 \cdot f} \quad (2.28)$$

Didapatkan persamaan akhir untuk besarnya nilai induktor L_2 adalah seperti pada persamaan 2.28. kemudian dengan menggunakan prinsip yang sama dengan yang digunakan dalam menghitung nilai L_2 , maka dapat ditentukan persamaan nilai induktor L_1 .

$$V_{in} \cdot I_{L1} = V_{C1} \cdot I_{L2} \quad (2.29)$$

$$I_{L1} = \frac{1}{(1-D)} \cdot \frac{V_{in}}{(1-D)^3 \cdot R} \quad (2.30)$$

$$I_{L1} = \frac{V_o}{(1-D)^2 \cdot R} \quad (2.31)$$

$$I_{L1} = \frac{\Delta I_{L1}}{2} \quad (2.32)$$

$$\frac{V_o}{(1-D)^2 \cdot R} = \frac{V_{in} \cdot D}{2 \cdot L_1 \cdot f} \quad (2.33)$$

$$L_1 = \frac{(1-D)^2 \cdot D \cdot (1-D)^2 \cdot R}{2 \cdot f} \quad (2.34)$$

$$L_1 = \frac{D \cdot (1-D)^4 \cdot R}{2 \cdot f} \quad (2.35)$$

Untuk menghitung nilai kapasitansi C_1 dan C_2 , prinsip yang digunakan adalah persamaan dasar jumlah muatan yang tersimpan dalam suatu kapasitor yaitu seperti yang ditunjukkan pada persamaan berikut :

$$\Delta Q_1 = C_1 \cdot \Delta V_{c1} \quad (2.36)$$

$$I_{L2} \cdot \Delta t_{on} = C_1 \cdot \Delta V_{c1} \quad (2.37)$$

Kemudian dilakukan substitusi persamaan 2.23 ke dalam persamaan 2.31 sehingga menghasilkan :

$$\frac{V_{c1}}{(1-D)^2 \cdot R} \cdot D \cdot T = C_1 \cdot \Delta V_{c1} \quad (2.38)$$

$$C_1 = \frac{V_{c1} \cdot D \cdot T}{(1-D)^2 \cdot R \cdot \Delta V_{c1}} \quad (2.39)$$

Maka persamaan akhir untuk menghitung nilai kapasitansi yang diperlukan adalah :

$$C_1 = \frac{V_o \cdot D}{(1-D) \cdot \Delta V_{c1} \cdot R \cdot f} \quad (2.40)$$

Dengan menggunakan prinsip yang sama dengan yang digunakan untuk menghitung nilai C_1 , maka persamaan C_2 didapatkan melalui :

$$\Delta Q_2 = C_2 \cdot \Delta V_o \quad (2.41)$$

$$I_o \cdot \Delta t_{on} = C_2 \cdot \Delta V_o \quad (2.42)$$

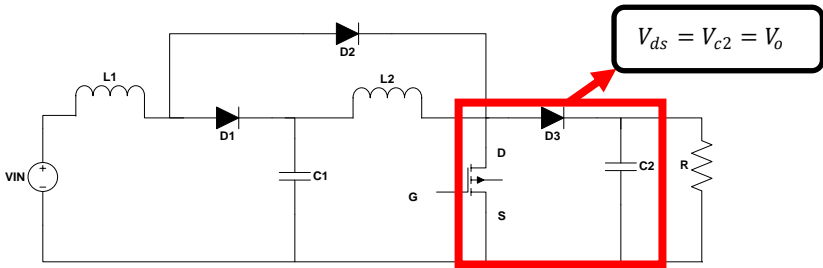
$$\frac{V_o \cdot D}{R \cdot f} = C_2 \cdot \Delta V_o \quad (2.43)$$

Maka, persamaan akhir untuk menghitung nilai kapasitansi C_2 adalah :

$$C_2 = \frac{V_o.D}{\Delta V_o.R.f} \quad (2.44)$$

2.3.4 Stress Tegangan pada *Switch* dan Dioda

Besarnya tegangan yang harus ditanggung oleh sakelar dan dioda bergantung pada topologi dari suatu konverter. Secara ideal, dioda akan menanggung tegangan apabila ada pada kondisi *reverse bias*, sakelar akan menanggung tegangan pada saat kondisi OFF atau terbuka. Untuk mengetahui *stress* tegangan pada dioda dan sakelar pada *quadratic boost converter*, dapat ditinjau gambar 2.10.



Gambar 2.10 Tegangan *drain-source* MOSFET

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa ketika sakelar terbuka, dioda 3 akan konduksi atau berada pada kondisi *forward bias* sehingga secara topologi, *drain-source* MOSFET parallel dengan kapasitor C_2 sehingga:

$$V_{ds} = V_o - 0 \quad (2.45)$$

$$V_{ds} = V_o \quad (2.46)$$

Besarnya tegangan pada dioda dapat diketahui dengan mencari tahu tegangan pada masing – masing katoda dan anoda dari dioda tersebut. Stress tegangan pada dioda 1 terjadi ketika sakelar berada pada kondisi ON *state* atau sakelar konduksi. Sehingga besarnya tegangan pada katoda dioda 1 pada kondisi ini adalah sama dengan tegangan kapasitor 1 karena berada pada *node* yang sama. Sedangkan anoda dioda 1 pada kondisi ini berada pada satu *node* dengan *ground* sistem, sehingga :

$$V_{d1} = V_{c1} - 0 \quad (2.47)$$

$$V_{d1} = V_{c1} \quad (2.48)$$

$$V_{d1} = V_{in} \left(\frac{1}{1-D} \right) \quad (2.49)$$

$$V_{d1} = V_o (1 - D) \quad (2.50)$$

Dengan cara yang sama, dapat dihitung *stress* tegangan pada dioda 2 dan dioda 3. Besarnya *stress* tegangan pada dioda 2 dapat ditentukan ketika sakelar pada kondisi OFF *state* atau sakelar terbuka. Pada kondisi ini, katoda berada satu *node* dengan kapasitor 2 sedangkan anoda berada satu *node* dengan kapasitor 1, sehingga :

$$V_{d2} = V_{c2} - V_{c1} \quad (2.51)$$

$$V_{d2} = V_{in} \left(\frac{1}{1-D} \right)^2 - V_{in} \left(\frac{1}{1-D} \right) \quad (2.52)$$

$$V_{d2} = V_{in} \left(\frac{1-(1-D)}{(1-D)^2} \right) \quad (2.53)$$

$$V_{d2} = V_{in} \left(\frac{D}{(1-D)^2} \right) \quad (2.54)$$

$$V_{d2} = V_o \cdot D \quad (2.55)$$

Pada saat sakelar konduksi, dioda 3 berada pada kondisi *reverse bias* sehingga menanggung sejumlah tegangan. Pada kondisi ini, katoda dioda 3 berada satu pada satu *node* dengan kapasitor 2 sedangkan anoda berada satu *node* dengan *ground* sistem konverter, sehingga :

$$V_{d3} = V_{c2} - 0 \quad (2.56)$$

$$V_{d3} = V_o \quad (2.57)$$

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

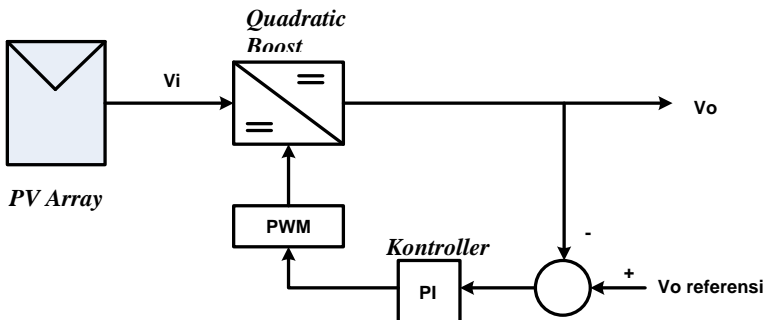
BAB 3

SIMULASI DAN IMPLEMENTASI KONVERTER

Pada bab ini akan dibahas simulasi dan juga implementasi dari rangkaian konverter secara keseluruhan. Namun, sebelum itu diperlukan perancangan untuk menentukan parameter rangkaian dan juga spesifikasi dari komponen yang akan digunakan.

3.1 Skema Sistem Konverter secara Keseluruhan

Perancangan dari implementasi konverter ini merupakan suatu sistem keseluruhan dimana masukan konverter berupa *PV Array*, kemudian selain rangkaian utama konverter juga terdapat sub rangkaian seperti rangkaian pembangkit gelombang PWM sebagai *trigger* pensakelaran dan juga rangkaian *feedback* sebagai controller tegangan keluaran konverter. Skema dari sistem konverter secara keseluruhan dapat dilihat pada gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.1 Skema Sistem Konverter keseluruhan

Perancangan dimulasi dengan menentukan spesifikasi *PV Array* yang akan digunakan sebagai masukan konverter yang berupa tegangan dan daya. Kemudian ditentukan parameter pada rangkaian konverter *quadratic boost* seperti tegangan keluaran, frekuensi pensakelaran dan parameter komponen rangkaian konverter. Setelah itu dilakukan simulasi statis atau *steady state* konverter untuk mengetahui bentuk gelombang arus maupun tegangan pada konverter. Kemudian dilanjutkan dengan simulasi *dinamis* konverter untuk mencari parameter controller konverter. Setelah itu, parameter controller yang sudah

didapatkan digunakan pada simulasi dinamik berikutnya untuk mengetahui gelombang respon tegangan keluaran konverter terhadap perubahan tegangan masukan dan juga terhadap perubahan arus keluaran. Setelah simulasi dinamik konverter, baru kemudian dilakukan implementasi *prototype* konverter.

3.2 Penentuan *PV Array* Sebagai Masukan Konverter

Sebagai input konverter dipilih 4 buah modul panel surya dengan spesifikasi seperti pada gambar 3.1 yang disusun seri, sehingga didapatkan tegangan spesifikasi *PV Array* sebagai berikut :

- Max Power : 320 Wp
- V_{mpp} : 70.4 V
- I_{mpp} : 4.63 A
- V_{oc} : 86.4 V
- I_{sc} : 5.09 A
- Max System Voltage : 800 V



Gambar 3.2 Nameplate Modul Panel Surya yang digunakan sebagai input konverter

Kemudian setelah dilakukan pengujian pada sistem *PV Array*, didapatkan performa Tegangan minimal yang dapat dihasilkan sebesar 40 V dan tegangan maksimal yang dapat dihasilkan adalah sebesar 68 V. Pada aplikasi *grid-connected micro inverter*, terjadi proses penaikkan tegangan DC ke DC (*step-up*) kemudian perubahan tegangan DC ke AC 220 V_{rms}. Sehingga untuk mencapai nilai tersebut, konverter *Quadratic*

Boost ini harus mampu menaikkan tegangan hingga 400 V, sebagai nilai tegangan minimal Bus DC konverter [2]. Dalam perancangan konverter ini, dipilih tegangan *output* maksimal yang dapat disalurkan sebesar 106,67 Watt dengan pertimbangan daya maksimal yang dapat dihasilkan dari *PV Array* setelah dilakukan pengujian.

3.3 Penentuan Parameter Rangkaian Konverter

Perancangan rangkaian konverter ini bertujuan untuk menyesuaikan parameter rangkaian dengan peralatan yang terdapat di laboratorium dan komponen yang tersedia dipasaran, sehingga memudahkan dalam proses implementasi alat. Perancangan diawali dengan menentukan beberapa variabel terlebih dahulu seperti:

- Frekuensi penyaklaran : 50 kHz
- Daya *output* : 106.67 W
- Tegangan *output* : 400 V
- Tegangan *input* (MIN) : 40 V
- Tegangan *input* (MAX) : 68 V
- *Ripple* tegangan *output* (Δv_o) : 1%

Penentuan daya keluaran sebesar 106.67 watt didasarkan pada kemampuan peralatan uji yang tersedia di laboratorium. Namun tegangan kerja yang digunakan masih menggunakan tegangan minimal dan maksimal *PV Array* hasil pengujian yaitu 40 volt dan 68 volt.

3.3.1 Penentuan Nilai Induktor L_1 dan L_2

Untuk menentukan nilai induktansi induktor yang digunakan, pertama kali dipertimbangkan adalah nilai induktansi minimal yang dibutuhkan agar konverter dapat beroperasi pada mode CCM pada nilai frekuensi pensakelaran yang digunakan. Kemudian setelah itu dilakukan simulasi kerja menggunakan *software* PSIM untuk mendapatkan nilai arus induktor rata-rata yang digunakan untuk menentukan nilai *ripple* induktor yang digunakan. Nilai *ripple* induktor yang diperbolehkan untuk desain konverter adalah sebesar 20 – 40%. Setelah menentukan *ripple* induktor yang diinginkan, kemudian ditentukan nilai induktor yang baru untuk implementasi konverter.

Berdasarkan persamaan 2.35 pada bab 2, dapat ditentukan nilai minimal induktor L_1 adalah sebagai berikut;

$$L_{1min} = \frac{0,587689 \cdot (1 - 0,587689)^4 \cdot 1000}{2.50000} = 0,171 \text{ mH}$$

Langkah berikutnya untuk menentukan nilai L yang akan digunakan pada implementasi adalah melihat nilai arus I_{L1} rata – rata dari hasil simulasi menggunakan *software* PSIM untuk kemudian menentukan nilai *ripple* arusnya. Namun sebelumnya dicari terlebih dahulu nilai L_2 minimal menggunakan persamaan 2.28 :

$$L_{2min} = \frac{0,587689 \cdot (1 - 0,587689)^2 \cdot 1000}{2.50000} = 1,1 \text{ mH}$$

Kemudian kedua nilai induktansi minimal tersebut digunakan pada simulasi untuk mendapatkan nilai arus rata-ratanya. Dari hasil simulasi didapatkan :

- I_{L1} rata-rata = 2,475 A
- I_{L2} rata-rata = 0,982 A
- Ditentukan *ripple* $I_{L1} = 30\% \times I_{L1} = 0,7425 \text{ A}$
- Ditentukan *ripple* $I_{L2} = 30\% \times I_{L2} = 0,2946 \text{ A}$

Kemudian dengan menggunakan persamaan 2.6, dapat ditentukan nilai induktor untuk nilai *ripple* yang diinginkan. Nilai induktor L_1 adalah sebesar :

$$L_1 = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta I_{L1} \cdot f} = \frac{68,0,587689}{0,7425 \cdot 50000} = 1,077 \text{ mH}$$

Dengan menggunakan persamaan 2.8, maka dapat ditentukan nilai induktor L_2 sebesar :

$$L_2 = \frac{V_{in} \cdot D}{(1 - D) \cdot \Delta I_{L2} \cdot f} = \frac{68,0,587689}{0,412311 \cdot 0,2946 \cdot 50000} = 6,581 \text{ mH}$$

Namun setelah menyesuaikan dengan kemudahan dalam proses pembuatan induktor, maka didapatkan nilai induktor akhir yang digunakan untuk implementasi konverter adalah sebagai berikut :

- Induktor 1 = 1,1 mH
- *Ripple* Arus Induktor 1 = 0,497 A
- Induktor 2 = 6,9 mH
- *Ripple* Arus Induktor 2 = 0,250 A

3.3.2 Penentuan Nilai Kapasitansi C_1 dan C_2

Untuk menentukan besar nilai kapasitansi konverter, terlebih dahulu ditentukan nilai *ripple* tegangan yang diinginkan. Ditentukan nilai *ripple* tegangan *Output* sebesar 1% dan nilai *ripple* tegangan pada Kapasitor 1 sebesar 1 %. Sehingga berdasarkan persamaan 2.39 pada bab 2 dapat ditentukan nilai kapasitor C_1 adalah sebagai berikut :

$$C_1 = \frac{400.0,683772}{(1 - 0,683772).1,265.1000.50000} = 13,674 \mu F$$

Nilai kapasitor C_2 dapat ditentukan melalui persamaan 2.44.

$$C_2 = \frac{400.0,683772}{4.1000.50000} = 1,3675 \mu F$$

Dengan memilih nilai kapasitansi yang lebih besar dari nilai minimal tersebut akan menghasilkan *ripple* tegangan yang lebih kecil. Hal itu sesuai dengan persamaan 2.39 dan persamaan 2.44 pada bab 2.

Nilai kapasitansi yang tersedia pada kapasitor DC komersial adalah antara 0.1 uF, 1 uF, 2.2 uF, 3.3 uF, 4.7 uF, 10 uF, 22 uF, 33 uF, 47 uF, 100 uF, 220 uF, 330 uF, 470 uF, 1000 uF, 2200 uF, 3300 uF dan 4700 uF. Sehingga dipilih kapasitor C_1 adalah sebesar 22 uF dan kapasitor C_2 sebesar 2.2 uF. Maka *ripple* tegangan yang akan dihasilkan dari masing – masing kapasitor C_1 dan C_2 ketika tegangan input konverter sebesar 40 volt dan daya *output* maksimal adalah sebagai berikut :

$$\Delta V_{c1} = \frac{V_o \cdot D}{(1 - D) \cdot R \cdot C_1 \cdot f} = \frac{400.0,683772}{347,85} = 0,524 V$$

$$\Delta V_{c2} = \frac{V_o \cdot D}{R \cdot C_2 \cdot f} = \frac{400.0,683772}{110} = 1,657 V$$

Besarnya nilai *ripple* tegangan C_2 adalah sama dengan besarnya *ripple* tegangan keluaran sehingga *ripple* ini juga menentukan besar kecilnya *ripple* arus keluaran untuk beban resistif murni.

3.4 Simulasi Kinerja Rangkaian Konverter

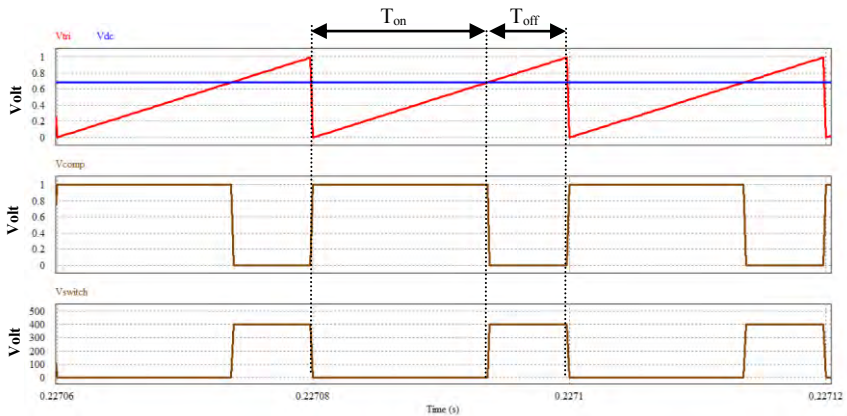
Dalam memulai simulasi, yang pertama kali dilakukan adalah nilai parameter komponen yang dipilih. Dengan mempertimbangan perhitungan nilai komponen minimal pada bab 3.3, penulis memilih nilai-nilai komponen sebagai berikut:

- Induktor L_1 : 1,1 mH
- Induktor L_2 : 6,9 mH
- Kapasitor C_1 : 22 μ F
- Kapasitor C_2 : 2.2 μ F
- Sakelar aktif : MOSFET n-channel

Kemudian nilai-nilai komponen tersebut digunakan pada simulasi menggunakan *software* PSIM untuk melihat hasil keluaran rangkaian. Kemudian akan dilakukan dua jenis simulasi. Yang pertama adalah simulasi ketika konverter dalam keadaan *steady state* dan yang kedua adalah simulasi ketika terdapat perubahan tegangan input dan daya keluaran pada konverter. Pada simulasi yang pertama akan diamati bentuk gelombang arus induktor, arus keluaran, tegangan kapasitor dan tegangan keluaran dari konverter. Sedangkan pada simulasi yang kedua, yang diamati adalah waktu respon controller PI pada konverter dalam mempertahankan tegangan keluaran pada nilai 400 Volt.

3.4.1 Simulasi Kondisi Tunak

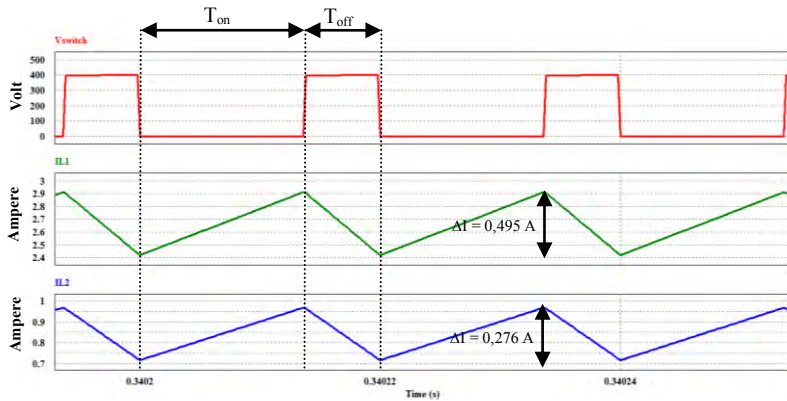
Pada simulasi ini digunakan sumber tegangan DC konstan dan controller *duty cycle* manual menggunakan komparator tegangan segitiga dan tegangan DC. Rangkaian keseluruhan simulasi ini dapat dilihat pada gambar 3.3. Ketika komparator menghasilkan tegangan, maka itu akan memicu *gate* pada MOSFET sehingga kutub *drain* dan *source* MOSFET akan konduksi sehingga arus akan dialirkan dari sumber melalui induktor lalu ke drain-source MOSFET. Bentuk gelombang D-S MOSFET akan selalu berkebalikan dengan G-S MOSFET karena sakelar ON ketika G-S MOSFET mendapat *trigger* berupa tegangan. Pada topologi *Quadratic Boost Konverter* ini, nilai tegangan pada D-S MOSFET ketika sakelar off akan sama dengan nilai tegangan *output* yaitu 400 volt.



Gambar 3.4 Gelombang *output* simulasi rangkaian PWM

Kemudian pengamatan dilakukan pada gelombang arus induktor, arus keluaran konverter dan juga arus yang mengalir pada MOSFET dan dioda. selain itu juga dilakukan pengamatan pada tegangan kapasitor, tegangan keluaran konverter dan juga stress tegangan pada dioda dan MOSFET. Pengamatan pada dioda dan MOSFET digunakan untuk menentukan jenis dan spesifikasi dioda dan MOSFET yang nantinya digunakan pada implementasi alat.

Digunakan sumber tegangan DC tetap sebesar 40 V dan daya keluaran 106,67 Watt dengan tegangan keluaran 400 V. Setelah dilakukan simulasi dengan *time step* sebesar 0,2 *microseconds* dan waktu simulasi selama 1 detik, didapatkan gelombang arus induktor seperti ditunjukkan pada gambar 3.5. berikut.



Gambar 3.5 Gelombang arus Induktor 1 dan induktor 2

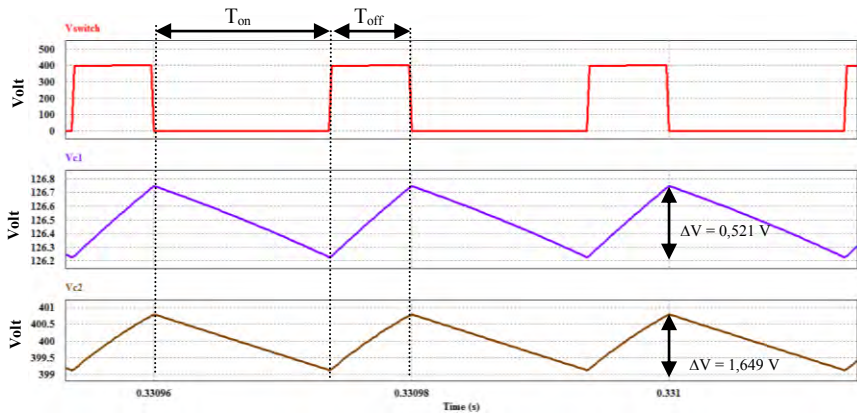
Nilai *ripple* arus induktor dihitung dengan mencari nilai arus maksimal dikurangi dengan arus minimal pada gelombang arus seperti perhitungan dibawah ini :

$$\begin{aligned}\Delta I_{L1} &= I_{L1} \max - I_{L1} \min \\ &= 2,913 \text{ A} - 2,418 \\ &= 0,495 \text{ A}\end{aligned}$$

Kemudian dengan cara yang sama, didapatkan nilai arus induktor 2 seperti hitungan dibawah ini.

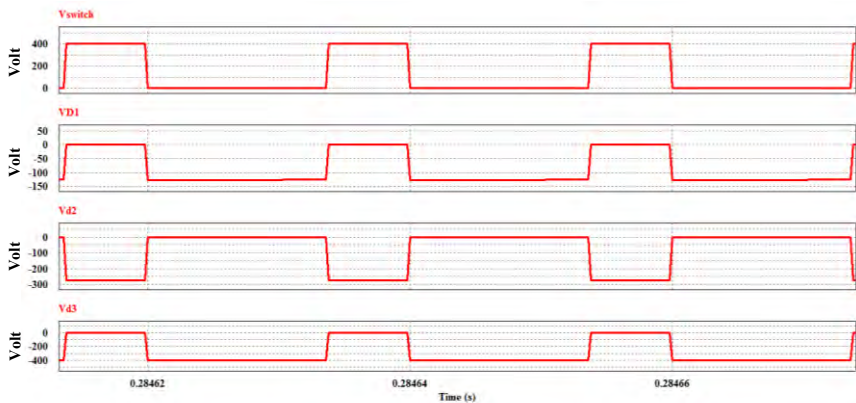
$$\begin{aligned}\Delta I_{L2} &= I_{L2} \max - I_{L2} \min \\ &= 0,967 \text{ A} - 0,718 \text{ A} \\ &= 0,249 \text{ A}\end{aligned}$$

Dengan *time step* dan lama simulasi yang sama, didapatkan gelombang tegangan kapasitor seperti pada gambar 3.6. besarnya nilai *ripple* tegangan kapasitor didapatkan dengan cara yang sama yaitu mencari nilai tegangan kapasitor maksimal dikurangi dengan nilai tegangan kapasitor minimal. Ketika sakelar konduksi, kapasitor akan menyalurkan energi dan ketika sakelar terbuka kapasitor akan mendapatkan suplai energi sebagaimana prinsip operasi yang dijelaskan pada bab 2. Besarnya nilai *ripple* tegangan kapasitor 2 sama dengan *ripple* teganga keluaran. Sehingga besarnya nilai *ripple* tegangan kapasitor 2 mempengaruhi besarnya nilai arus keluaran konverter.



Gambar 3.6 Gelombang arus Kapasitor 1 dan Kapasitor 2

Besarnya stress tegangan pada ketiga dioda pada rangkaian dapat dilihat pada bentuk gelombang hasil simulasi berikut.

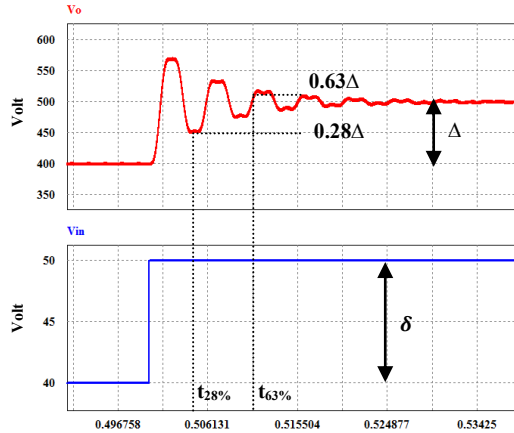


Gambar 3.7 Stress tegangan pada switch dan dioda

3.4.2 Simulasi Kerja Dinamis Konverter

Pada simulasi ini pertama kali mencari parameter kontroller konverter yang akan digunakan pada simulasi dinamik konverter. Metode yang digunakan untuk mencari parameter tersebut adalah *reaction curve* [9] sehingga akan dilakukan pengamatan pada respon tegangan keluaran konverter terhadap perubahan tegangan masukan. Setelah dilakukan simulasi untuk perubahan tegangan masukan dari 40

volt ke 50 volt, didapatkan gelombang respon seperti ditunjukkan pada gambar 3.8 berikut.



Gambar 3.8 Respon Tegangan Keluaran terhadap perubahan tegangan masukan tanpa kontroller

Dari gambar diatas dapat dihitung parameter *gain* (K_p), *dead time* (θ) dan *time constant* (τ) yang nantinya akan digunakan pada simulasi dinamis konverter dengan menggunakan persamaan berikut :

$$K_p = \Delta / \delta$$

$$\tau = 1.5(t_{63\%} - t_{28\%})$$

$$\theta = t_{63\%} - \tau$$

$$t_{28\%} = \theta + \frac{\tau}{3}$$

$$t_{63\%} = \theta + \tau$$

Dimana :

Δ = Perubahan magnitude *steady state* pada *output*

δ = Perubahan magnitude *steady state* pada *input*

$t_{63\%}$ = waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 63% dari nilai akhir

$t_{28\%}$ = waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 28% dari nilai akhir

Dengan mengamati respon tegangan keluaran pada gambar 3.8, didapatkan nilai-nilai parameter yang dibutuhkan yang dirangkum pada tabel 3.1 berikut.

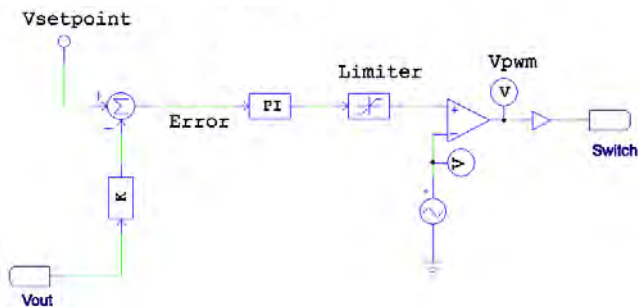
Tabel 3.1 Parameter Kontrol menggunakan proses *reaction curve*

Base	Steady	Delta	Gamma	Delta63%	Delta28%	t63%	t28%
400	499.58	99.58	10	462.7354	427.8824	0.3358688	0.149275

Dengan menggunakan rumus diatas didapatkan gain (K_p) sebesar 9.958 dan time constant sebesar 0,279890625. Kemudian parameter tersebut digunakan pada simulasi dinamis untuk menjaga tegangan tetap konstan pada perubahan tegangan masukan dan perubahan arus keluaran.

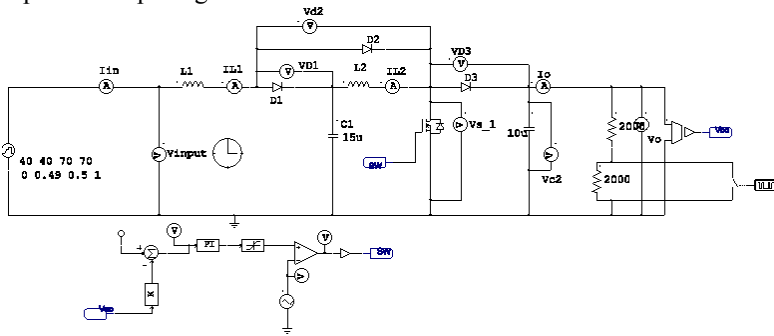
Pada simulasi ini digunakan *piecewise linear* sebagai input tegangan yang berubah – ubah dan sakelar *gating block* pada beban untuk mensimulasikan karakteristik panel surya dimana memiliki tegangan yang berubah-ubah dan daya yang berubah-ubah. Direncanakan tegangan input berubah dari 40 volt hingga 70 volt dan beban diubah dari arus keluaran 0,2 ampere ke 0,4 ampere. Kemudian akan dilakukan pengamatan pada *time settling* konverter dalam emmpertahankan tegangan keluaran pada nilai 400 volt.

Sebagai *trigger* untuk sakelar aktif digunakan pembangkit sinyal PWM dari komparator tegangan DC dan tegangan segitiga sehingga *duty cycle* dan frekuensi PWM dapat dikontrol dengan mengatur besar tegangan DC dan frekuensi dari gelombang segitiga. Untuk mengatur besar tegangan DC sebagai pengatur *duty cycle* pada pembangkit PWM digunakan kontroller *Proportional-Integral* (PI) dengan nilai parameter yang didapatkan dari proses *reaction curve* sebagaimana yang dijelaskan pada sub bab sebelumnya.



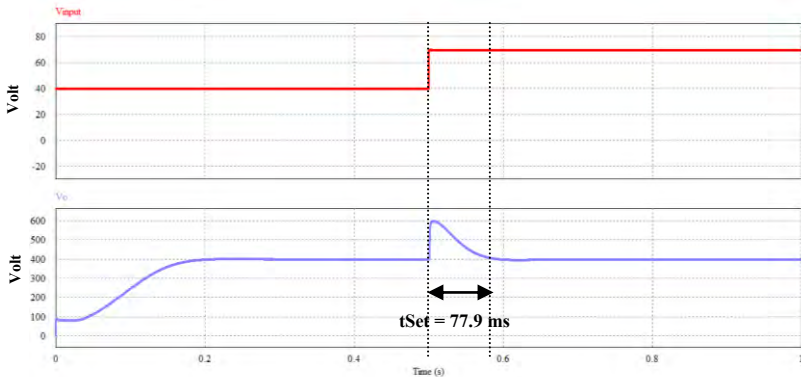
Gambar 3.9 Perancangan pembangkit sinyal PWM dan kontroller *duty cycle* dengan menggunakan kontroller PI

Rangkaian keseluruhan simulasi kerja dinamik konverter ini dapat dilihat pada gambar 3.9 berikut.



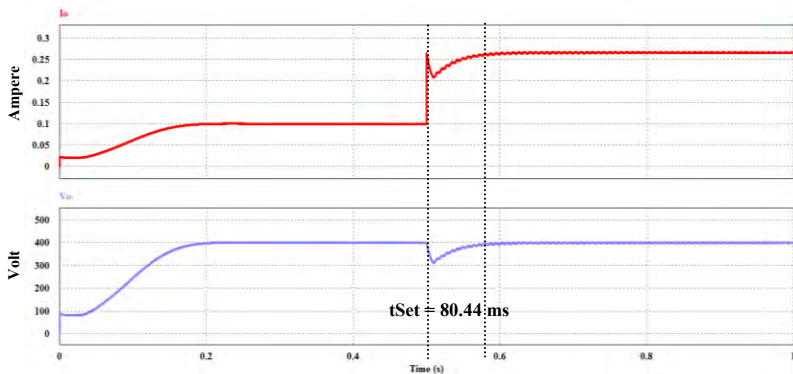
Gambar 3.10 Rangkaian Simulasi Kerja Dinamis Konverter

Simulasi dilakukan dengan *time step* 0,2 *microseconds* selama 1 detik dan dilakukan perubahan pada tegangan input sehingga didapatkan hasil gelombang seperti pada gambar 3.10.



Gambar 3.11 Respon perubahan tegangan keluaran terhadap perubahan tegangan input

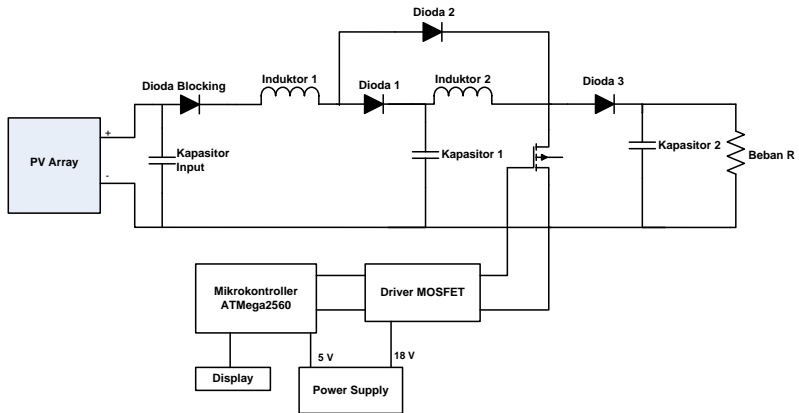
Dengan parameter simulasi yang sama, kemudian digunakan sumber tegangan DC tetap dan dilakukan perubahan pada arus keluaran dengan menggunakan *gating block* untuk merubah nilai resistansi beban sehingga didapatkan hasil seperti pada gambar 3.11 berikut.



Gambar 3.12 Respon perubahan tegangan keluaran terhadap perubahan arus *output*

3.5 Implementasi Rangkaian Konverter

Skema perancangan rangkaian konverter *Quadratic Boost* secara keseluruhan terdiri dari berbagai sub rangkaian seperti ditunjukkan pada gambar 13. dari sistem keseluruhan tersebut dibagi menjadi beberapa sub rangkaian seperti rangkaian pembangkit gelombang PWM, rangkaian *driver* MOSFET, rangkaian *feedback* dan rangkaian utama. Pembuatan dilakukan per sub rangkaian yang kemudian dilakukan pengujian. Setelah setiap sub rangkaian dapat bekerja sesuai dengan perancangan kemudian dilakukan penggabungan seluruh sub rangkaian menjadi sistem konverter.



Gambar 3.13 Perancangan Implementasi secara keseluruhan

Hierarki atau urutan pekerjaan dimulai dari rangkaian pembangkit gelombang PWM. Pin keluaran pada modul arduino mega 2560 akan menghasilkan gelombang on dan off dengan *amplitud* sebesar 5 volt pada kondisi on dan 0 volt pada kondisi off. Gelombang ini kemudian akan menjadi input bagi IC TLP 2560 yang ada pada rangkaian *driver* MOSFET. IC TLP 2560 ini selain mendapat inputan berupa gelombang PWM juga mendapat suplai tegangan 18 volt dari rangkaian power supply. Kemudian pin keluaran IC TLP 250 ini akan menghasilkan gelombang PWM dengan *amplitud* sebesar 18 volt dengan frekuensi dan *duty cycle* yang sama dengan gelombang PWM yang dihasilkan dari Arduino Mega 2560. Kemudian gelombang PWM dari rangkaian *driver* MOSFET ini akan *mentrigger* MOSFET yang ada pada rangkaian utama sehingga akan terjadi *switching* on-off pada rangkaian utama konverter.

Rangkaian pembangkit gelombang PWM terdiri dari modul Arduino Mega 2560 yang memiliki prosesor berbasis Mikrokontroller AT Mega 2560. Kemudian dilakukan pembuatan *shield* sebagai *board* untuk LCD *display*, *push button* dan rangkaian *driver* MOSFET. LCD *display* menggunakan ukuran 2 x 16 untuk menampilkan *duty cycle* dan parameter kontroller. *Push button* dibuat 2 buah untuk merubah nilai *duty cycle* bertambah dan berkurang pada mode operasi manual yang digunakan untuk melakukan pengujian rasio konversi dan efisiensi.

Bagian yang lain adalah rangkaian *driver* MOSFET yang terdiri dari IC TLP 2560 dan resistor seri dan parallel untuk membatasi nilai arus yang masuk pada IC.

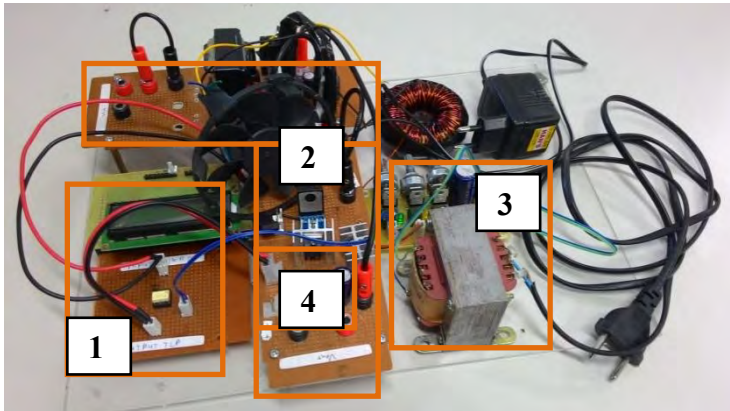
Mode operasi pembangkitan gelombang pada rangkaian PWM ini ada dua macam yaitu mode manual dan mode otomatis. Mode manual digunakan ketika rangkaian konverter beroperasi secara *close loop* untuk melakukan pengujian rasio konversi dan efisiensi. Sedangkan mode otomatis digunakan ketika rangkaian konverter dioperasikan pada tegangan input panel surya sehingga *duty cycle* akan berubah-ubah secara otomatis sesuai dengan nilai tegangan *output* yang ingin dijaga konstan. Perbedaan pada kedua mode tersebut hanya pada *listing* programnya. Pada mode manual, *listing* program hanya terdiri dari program pembangkitan PWM, *display* parameter serta kontrol manual dengan menggunakan *push button*. Sedangkan pada mode otomatis, *listing* program terdiri dari program penmbangkitan PWM, *display* parameter serta kontroller *proportional-integral* untuk mengubah-ubah nilai *duty cycle* agar tegangan *output* dapat dijaga konstan pada nilai 400 volt. *Listing* program untuk kedua mode operasi tersebut dapat dilihat pada lampiran.

Implementasi dari rangkaian utama menggunakan komponen – komponen dengan spesifikasi yang sudah ditentukan pada sub bab sebelumnya, sehingga bila diringkas spesifikasi seluruh komponen dapat dilihat pada tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2 Spesifikasi Komponen Rangkaian Utama Konverter

Komponen	Nilai
L1	1,1 mH
L2	6,9 mH
C1	22 uF
C2	2.2 uF
MOSFET	500 V/20A
Dioda 1,2,3	600 V/15 A

Rangkaian sistem konverter secara keseluruhan merupakan gabungan dari seluruh sub rangkaian dan komponen yang sudah dijelaskan pada sub bab sebelumnya. Hasil implementasi sistem ini dapat dilihat pada gambar 3.14. konverter dioperasikan dengan memberikan sumber tegangan DC atau panel surya pada port input dan menghubungkan beban pada port *output*. Untuk dapat beroperasi konverter harus dihubungkan dengan sumber tegangan 220 volt AC. Pada mode *close loop*, konverter akan secara otomatis akan menghasilkan tegangan keluaran sebesar 400 volt dengan tegangan minimal 40 volt dan tegangan maksimal sebesar 68 volt. Pada gambar 3.17 terlihat *fan* yang berguna sebagai pendingin MOSFET agar tetap bekerja dengan optimal pada kondisi beban yang berubah-ubah. Mode operasi yang lain dari konverter ini adalah mode *open loop* yang berguna untuk proses pengujian maupun *troubleshooting* gangguan pada rangkaian. Pada mode *open loop* ini, *duty cycle* di atur secara manual menggunakan 2 *push button* untuk menambah nilai dan mengurangi nilai *duty cycle* sehingga didapatkan tegangan keluaran sesuai yang diinginkan.



Gambar 3.14 Implementasi Alat secara keseluruhan

Keterangan :

- 1 : Rangkaian pembangkit gelombang PWM dan *driver* MOSFET
- 2 : Rangkaian utama
- 3 : Rangkaian *Power supply*
- 4 : Rangkaian *feedback close loop*

Implementasi konverter ini masih dalam tahap *prototype* sehingga untuk segi estetika dan *packaging* dari alat belum diperhatikan. Hal ini bertujuan untuk mempermudah pengujian dan juga *troubleshooting* rangkaian. Namun kedepannya ketika akan dilakukan implementasi jenis konverter yang sama, dapat dipertimbangkan untuk memperhatikan segi estetika dan *packaging* agar rangkaian lebih *compact* dan efisien setelah ditemukan kombinasi *spacing* dan pengkabelan yang tepat.

BAB 4

PENGUJIAN DAN ANALISIS PERFORMA *QUADRATIC BOOST CONVERTER*

Pada bab ini akan diuraikan data hasil pengujian terhadap alat hasil implementasi dan analisis terhadap data tersebut yang meliputi hasil pengujian konverter dalam kondisi *steady state* dan juga pengujian konverter dalam kondisi kerja dinamis. Pada pengujian *steady state* meliputi pengujian gelombang, pengujian rasio konversi, serta pengujian efisiensi kerja konverter. Sedangkan pengujian dinamis konverter meliputi pengujian terhadap perubahan tegangan masukan dan pengujian terhadap perubahan arus keluaran konverter.

4.1 Pengujian *Steady State* Konverter

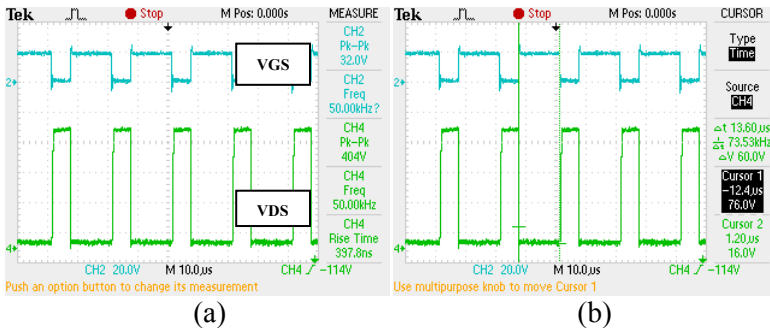
Pada pengujian ini, dilakukan tiga kali pengujian yaitu pengujian gelombang, pengujian rasio konversi dan juga pengujian efisiensi kerja konverter.

4.1.1 Pengujian Gelombang

Pengujian gelombang dilakukan untuk membandingkan bentuk dan juga nilai dari masing-masing gelombang dengan hasil simulasi maupun hasil dari perhitungan teori, sehingga dapat diketahui performa dari konverter hasil implementasi. Isi dari bab ini akan dibagi menjadi tiga sub bab yaitu pengujian dan analisis gelombang pensakelaran, gelombang arus induktor dan gelombang tegangan kapasitor.

4.1.1.a Pengujian dan Analisis Gelombang Pensakelaran

Gambar 4.1 menunjukkan perbandingan antara gelombang tegangan keluaran dari IC TLP 250 yang merupakan *trigger* untuk *gate-source* MOSFET dengan gelombang tegangan *drain-source* MOSFET. Pada gambar 4.1 a dapat dilihat nilai *amplitude* tegangan masing-masing gelombang dan pada gambar 4.1 b dapat dilihat waktu *state* ON sakelar atau waktu ketika sakelar konduksi.



Gambar 4.1 Amplitud Gelombang PWM Mikrokontroller dan tegangan *Drain-Source* MOSFET (a), waktu ON PWM dan sakelar (b)

Dari gelombang diatas dapat diketahui nilai tegangan *gate-source* MOSFET ketika sakelar konduksi adalah sebesar 18 volt. Nilai ini sesuai dengan besarnya nilai tegangan suplai yang diinputkan pada rangkaian *driver* MOSFET menggunakan *DC Power Supply*. Namun jika dilihat pada pembacaan tektronix terlihat bahwa nilai tegangan *peak-peak* adalah sebesar 32 volt. Hal ini dikarenakan terdapat *spike* tegangan pada waktu transisi dari kondisi sakelar ON ke sakelar OFF dan juga dari sakelar OFF ke sakelar ON. Secara fisik *spike* tegangan ini berupa lonjakan bentuk gelombang sesaat yang sangat tinggi menuju nilai tegangan positif atau menuju tegangan negatif. Pada alat ini diketahui *spike* menuju kearah tegangan positif ketika peralihan dari kondisi sakelar OFF menuju kondisi sakelar ON. *Spike* tegangan menuju arah tegangan negatif ketika kondisi peralihan dari sakelar ON ke kondisi sakelar OFF. Adanya *spike* tegangan ini akan menyebabkan adanya *spike* pada arus induktor dan juga *spike* pada tegangan kapasitor.

Kedua gelombang pada gambar 4.1 diambil pada kondisi tegangan output sebesar 404 volt dan tegangan input sebesar 50 volt. Secara teoritis, pada kondisi tersebut besarnya *duty cycle* dapat dihitung menggunakan persamaan 2.19, sehingga :

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \left(\frac{1}{1-D} \right)^2$$

$$1-D = \sqrt{\frac{V_{in}}{V_o}}$$

$$D = 1 - \sqrt{\frac{V_{in}}{V_o}}$$

$$= 1 - \sqrt{\frac{50}{404}} = 0,6482$$

Namun hasil pengujian gelombang menunjukkan nilai yang berbeda. Pada gambar 4.1 b dapat kita lihat *cursor* pada osiloskop menunjukkan waktu sakelar konduksi adalah sebesar 13,6 *microseconds*. Sehingga besarnya nilai *duty cycle* aktual alat hasil implementasi adalah sebesar :

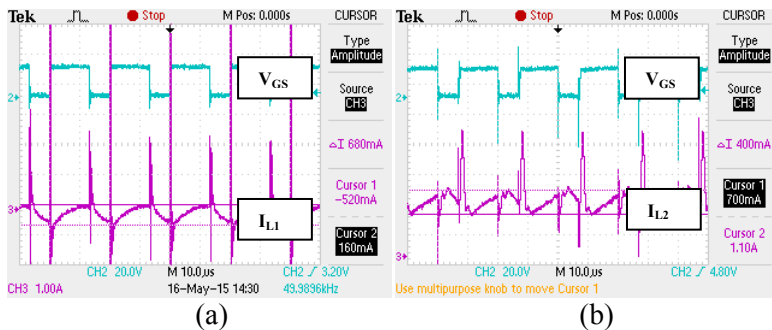
$$D = \frac{t_{on}}{T} = \frac{13,6}{20} = 0,68$$

Dimana t_{on} adalah waktu lamanya sakelar konduksi dan T adalah lamanya periode pensakelaran aktual. Pada gambar 4.1 a dapat dilihat nilai frekuensi gelombang pada *channel 2* osiloskop, yaitu gelombang tegangan *gate-source* MOSFET menunjukkan nilai 50 kHz. Sehingga besarnya periode pensakelaran adalah 1/frekuensi yaitu 20 *microseconds*. Dari hasil perhitungan diatas didapatkan adanya eror rasio konversi dari alat hasil implementasi. Besarnya nilai eror rasio konversi lebih detail akan dibahas pada sub bab pengujian rasio konversi.

Pada kondisi sakelar OFF, gelombang V_{GS} menunjukkan nilai 0 volt dan tegangan V_{DS} bernilai 404 volt sebagaimana dijelaskan diatas. Pada kondisi sakelar ON, secara teori tegangan V_{DS} bernilai 0 volt. Namun pada gambar 4.1 didapati terdapat tegangan sebesar 20 volt. Hal ini dapat dipahami bahwa adanya tegangan tersebut merupakan rugi tegangan konduksi akibat adanya resistansi konduksi MOSFET (RDS_{on}).

4.1.1.b Pengujian dan Analisis Gelombang Arus Induktor

Dari pengujian gelombang arus induktor, didapati adanya *spike* arus yang tinggi pada transisi kondisi pensakelaran sebagaimana dijelaskan pada sub bab sebelumnya. Nilai *spike* ini sangat tinggi sebagaimana dapat dilihat pada gambar 4.3, yaitu hingga 4 kali lipat dari besarnya *ripple* arus. Arus *spike* ini dapat dikurangi dengan menambahkan kombinasi resistor pada sisi keluaran rangkaian *driver* MOSFET sehingga *spike* pada sakelar menjadi berkurang, begitu juga dengan *spike* pada arus induktor.



Gambar 4.2 Gelombang arus induktor 1 (a), gelombang arus induktor 2 (b) saat tegangan keluaran 400 V dan daya 106.67 watt

Gelombang utama dari arus induktor 1 sebagaimana pada gambar 4.3 a adalah berbentuk eksponensial positif pada saat sakelar konduksi atau pada waktu t_{on} , berbentuk eksponensial negatif pada saat sakelar terbuka atau pada saat t_{off} . Ini sedikit berbeda dengan hasil simulasi pada bab 3 yang menghasilkan bentuk gelombang segitiga. Hal ini dapat dipahami dengan meninjau faktor kualitas dari induktor 1 pada implementasi konverter. Semakin besar faktor kualitas dari induktor, maka nilai resistansi konduktor pada induktor sangat kecil sehingga performa induktor akan mendekati ideal yaitu menghasilkan gelombang segitiga ketika proses *charging* dan *discharging* atau dapat dikatakan mengalami perubahan nilai arus secara linear. Induktor yang digunakan pada implementasi ini memiliki resistansi yang cukup besar sehingga perubahan nilai arus pada proses *charging* dan *discharging* tidak berubah secara linear. Berbeda dengan gelombang arus induktor 1, bentuk gelombang arus induktor 2 hasil implementasi hampir mendekati dengan hasil simulasi. Hanya saja, sebagaimana dapat dilihat pada gambar 4.3 b, pada gelombang arus induktor 2 juga terdapat *spike* arus sebagaimana pada induktor 1. Namun besar dari *spike* arus induktor 2 tidak terlalu besar seperti pada induktor 1.

Pada gambar 4.3 a dan b dapat kita lihat nilai *ripple* arus induktor 1 dan 2 hasil implementasi alat. Nilai dari *ripple* arus tersebut sedikit lebih besar dari hasil simulasi dan juga dari perhitungan teoritis. Secara lebih ringkas, nilai *ripple* arus dari hasil perhitungan teori, simulasi dan implementasi dapat kita bandingkan pada tabel 4.1.

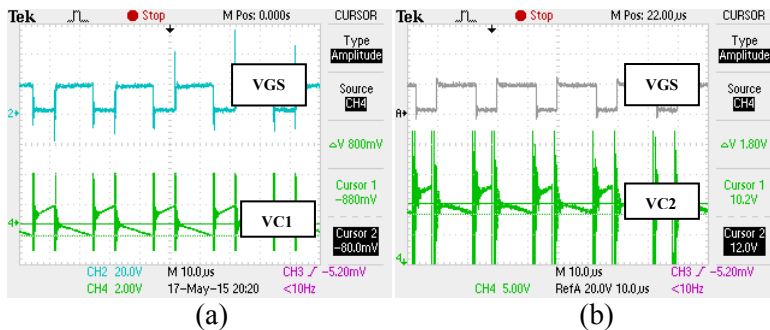
Tabel 4.1 Perbandingan nilai *ripple* arus induktor 1 dan 2 pada perhitungan, dan implementasi alat

	Perhitungan Teoritis	Implementasi
<i>Ripple Induktor 1</i>	0,497 A	0,680 A
<i>Ripple Induktor 2</i>	0,249 A	0,400 A

Berdasarkan tabel diatas dapat dilihat bahwa nilai *ripple* arus induktor hasil simulasi lebih besar dari hasil perhitungan teoritis. Begitu juga nilai *ripple* hasil pengujian alat memiliki nilai lebih besar dari hasil simulasi dan juga perhitungan teoritis. Hal ini disebabkan karena semakin kecilnya faktor idealitas komponen, terutama induktor ketika pada simulasi dan juga implementasi alat. Pada simulasi, pengukuran dibatasi oleh adanya *time step* atau *time sampling* untuk mendapatkan nilai arus induktor. Sedangkan pada pengujian alat hasil implementasi dibatasi karena adanya faktor kualitas induktor dan juga *time sampling* pada osiloskop yang digunakan dalam pengujian.

4.1.1.c Pengujian dan Analisis Gelombang Tegangan Kapasitor

Bentuk gelombang kapasitor 1 dan kapasitor 2 hasil implementasi sedikit berbeda dengan hasil simulasi. Dari gelombang hasil pengujian pada gambar 4.4, dapat diketahui pada saat sakelar terbuka, terdapat kenaikan nilai tegangan kapasitor secara linear, dan terjadi penurunan nilai tegangan secara linear saat sakelar konduksi. Namun, penurunan nilai tegangan tersebut tidak dimulai dari nilai tegangan maksimal saat kapasitor *charging*, berbeda dengan hasil simulasi yang menunjukkan bentuk gelombang eksponensial yang mendekati segitiga. Selain itu, perbedaan lain gelombang tegangan kapasitor hasil implementasi dengan simulasi adalah adanya *spike* tegangan pada waktu transisi dari sakelar ON ke sakelar OFF dan sebaliknya.



Gambar 4.3 Gelombang tegangan kapasitor 1 (a), gelombang tegangan kapasitor 2 (b) saat tegangan keluaran 400 V dan tegangan input 40 V

Nilai *ripple* tegangan untuk kapasitor 1 dan kapasitor 2 masing – masing masih mendekati dengan hasil simulasi dan juga perhitungan teoritis. Perbandingan untuk hasil perhitungan teori, simulasi dan juga pengujian alat hasil implementasi dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Perbandingan nilai *ripple* tegangan kapasitor 1 dan 2 pada perhitungan dan implementasi alat

	Perhitungan Teoritis	Implementasi
Ripple Kapasitor 1	0,524 V	0,8 V
Ripple Kapasitor 2	1,657 V	1,8 V

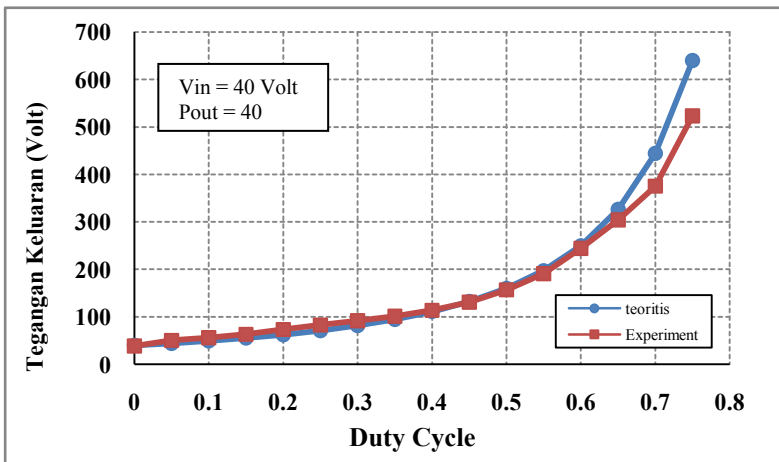
Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan antara hasil perhitungan teoritis, simulasi dan juga pengujian menggunakan osiloskop digital. Hasil pengujian lebih besar dari hasil perhitungan dan simulasi dikarenakan keterbatasan pada alat ukur yang berupa *time sampling* dan juga kualitas dari kapasitor yang digunakan.

4.1.2 Pengujian Rasio Konversi

Secara teoritis, rasio konversi dari *Quadratic Boost Converter* merupakan fungsi kuadrat dari rasio konversi dari konverter *Boost* konvensional. Sehingga, seiring bertambahnya *duty cycle*, maka rasio konversi dari konverter akan semakin besar sebagaimana pada gambar 4.4. pengujian untuk rasio konverter hasil implementasi menggunakan tegangan input sebesar 40 volt dan dengan daya keluaran minimal yaitu 40 watt. Hasil pengujian menunjukkan adanya eror rasio konversi dari

konverter hasil implementasi dengan nilai yang berbeda-beda untuk *duty cycle* yang berbeda sebagaimana dapat dilihat pada gambar 4.4.

Dari tabel diatas dapat diketahui bahwa semakin besar *duty cycle* konverter, semakin besar pula eror rasio konversi sehingga didapatkan tegangan keluaran yang tidak sesuai dengan tegangan keluaran secara teoritis. Untuk *duty cycle* kurang dari 0,5, eror konversi meunjukkan nilai negatif yang berarti tegangan keluaran hasil implementasi lebih besar dari nilai tegangan secara perhitungan teori. Perbandingan rasio konversi teori dengan hasil implementasi alat dapat dilihat pada gambar 4.4.

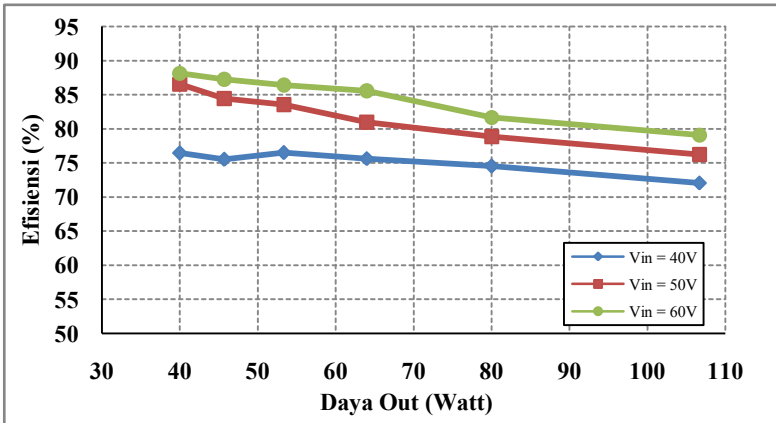


Gambar 4.4 Kurva rasio *quadratic boost converter* secara perhitungan teori dan hasil pengujian implementasi alat

Dari gambar 4.4 dengan jelas dapat kita lihat bahwa semakin besar *duty cycle*, dengan jelas dapat kita lihat bahwa semakin besar *duty cycle*, berarti semakin besar pula tegangan keluaran sehingga arus yang mengalir pun semakin besar (beban yang digunakan resistif murni). Sehingga rugi-rugi pada rangkaian yang berupa rugi konduktor dan rugi konduksi semakin besar, kemudian menyebabkan *drop* tegangan pada rangkaian semakin besar.

4.1.3 Pengujian Efisiensi Kerja Konverter

Pengujian efisiensi konverter dilakukan untuk tegangan input yang ebrbeda yaitu dari tegangan input minimal hingga tegangan input maksimal dan juga untuk daya minimal hingga daya maksimal. Sebagaimana digunakan parameter desain konverter *Quadratic Boost* ini pada bab 3, didapatkan hasil pengujian efisiensi konverter seperti pada gambar 4.6 berikut ini.



Gambar 4.5 Kurva Efisiensi *Quadratic Boost Converter* pada tegangan input 40 V, 50 V dan 60 V untuk daya keluaran yang berbeda

Dari kurva diatas dapat dilihat bahwa konverter dapat bekerja optimal pada daya masukan maksimal dan daya keluaran minimal. Efisiensi konverter semakin turun apabila daya yang mengalir semakin besar atau tegangan masukan konverter semakin kecil. Hal ini dapat dipahami karena jika daya semakin besar, maka arus yang mengalir semakin besar karena rugi daya dan rugi tegangan pada rangkaian juga menjadi semakin besar. Begitu juga yang terjadi jika tegangan masukan semakin kecil, maka untuk tegangan keluaran yang tetap maka arus yang mengalir pun menjadi semakin besar sehingga rugi tegangan dan rugi daya pada rangkaian menjadi semakin besar.

Efisiensi dari konverter ini dapat ditingkatkan dengan memperhatikan manajemen panas pada setiap komponen terutama komponen semikonduktor karena rawan dengan rugi daya, memilih jenis

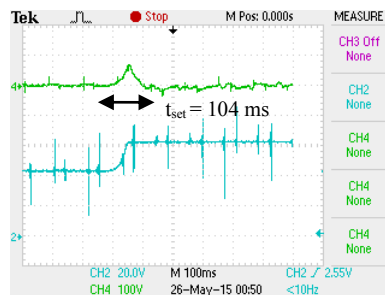
komponen yang berkualitas tinggi sehingga memiliki *parasitic component* yang tidak terlalu besar. Selain itu juga perlu mempertimbangkan *spacing* antar komponen yang digunakan dalam rangkaian sehingga dapat mengurangi besarnya *parasitic component* dari faktor konduktor namun juga tidak menyebabkan *electromagnetic interference* yang terlalu besar.

4.2 Pengujian Respon Dinamik Konverter

Konverter *Quadratic Boost* ini dirancang untuk dapat menghasilkan tegangan keluaran pada nilai 400 V untuk tegangan input yang berubah-ubah dari 40 V sampai 60 V dan juga untuk daya keluaran yang berubah – ubah yang direpresentasikan dengan perubahan arus keluaran konverter.

4.2.1 Perubahan Tegangan Masukan

Pengujian ini dilakukan dengan memberikan perubahan tegangan masukan seketika pada konverter dari nilai 40 volt ke nilai 60 volt. Kemudian diamati bentuk tegangan keluaran konverter sehingga didapatkan gelombang seperti pada gambar 4.7.



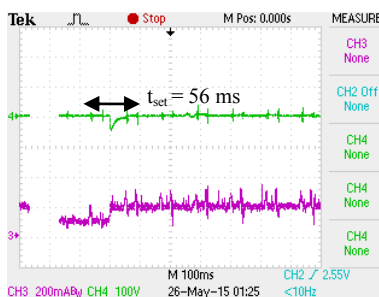
Gambar 4.6 Respon tegangan keluaran untuk perubahan tegangan input

Pada saat terjadi perubahan tegangan input dari 40 V ke 60 V, kontroller membutuhkan waktu selama 104 ms untuk menjaga tegangan keluaran tetap konstan pada 400 V. Selama waktu tersebut, sesaat tegangan keluaran naik, kemudian kembali pada nilai konstan. Hal ini dapat dipahami karena ketika tegangan input naik seketika, kontroller belum memberikan keluaran berupa perubahan *duty cycle* yang seharusnya lebih kecil dari sebelumnya untuk mempertahankan nilai tegangan keluaran. Lama waktu respon ini dapat dikurangi dengan

meningkatkan *time konstan* controller. Hal serupa terjadi ketika terjadi perubahan pada arus keluaran.

4.2.2 Perubahan Arus Keluaran

Pengujian ini dilakukan dengan melakukan perubahan arus keluaran seketika pada konverter dengan mengatur nilai resistansi beban. Kemudian dilakukan pengamatan pada tegangan keluaran konverter sehingga didapatkan gelombang seperti pada gambar 4.8 berikut.



Gambar 4.7 Respon tegangan keluaran untuk perubahan arus keluaran

Sebagaimana dapat dilihat pada gambar 4.2 b, sesaat tegangan keluaran mengalami penurunan nilai yang sangat kecil ketika arus keluaran meningkat. Hal ini dikarenakan ketika arus meningkat, maka rugi tegangan pada rangkaian menjadi semakin besar sehingga tegangan keluaran menjadi lebih kecil. Pada gelombang respon dapat dilihat bahwa konverter membutuhkan waktu selama 56 ms untuk mempertahankan tegangan keluaran tetap konstan pada nilai 400 volt.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wibowo Edi, Suryoatmojo Heri, Candra Dedet, “*Perancangan dan Implementasi Konverter Boost Rasio Tinggi dengan Transformator Hybrid untuk Aplikasi Photovoltaic*”, Proseding Seminar Tugas Akhir Teknik elektro FTI-ITS, Juni. 2014.
- [2] Kadri Riad, Gaubert Jean-Paul, Champenois Gerard, Mostefai Mohamed, “*Performance Analysis of Transformerless Single Switch Quadratic Boost Converter for Grid Connected Photovoltaic Systems*”, XIX International conference on Electrical Machines, 2010, Rome.
- [3] Keshav Patidar. 2014. *High step-up Converters Based on Quadratic Boost Converter for Micro-inverter*. Electric Power Systems Research 119, page 168-177, ScienceDirect.
- [4] Masters, Gilbert M, “*Renewable and Efficient Electric Power System*”, New Jersey: John Wiley & Sons Inc. 2004. Hart, Daniel W., “*PowerElectronics*”, McGraw-Hill, 2011.
- [5] Rashid, Muhammad H. “*Power Electronics: Circuit, Devices and Application*”, Pearson prentice Hall, 2009.
- [6] Hart, Daniel W., “*PowerElectronics*”, McGraw-Hill, 2011.
- [7] Lopez Oswaldo, Martinez Luis, Garcia Germain, Valderrama Hugo, Mercurri Daniel, “*Efficiency Analysis of sliding-mode controlled quadratic boost converter*”, IET Power Electronics., Nov. 2012.
- [8] Williams Barry, “*Power Electronics*”, University of Strathclyde, Galsgow.
- [9] Yusivar feri, Jepry, “*Perancangan Pengendali PID pada Proportional valve*”, Universitas Indonesia, Mei. 2010.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 5

PENUTUP

Dalam bab ini disajikan beberapa kesimpulan dari tugas akhir ini beserta saran untuk kelengkapan dan kelanjutan penelitian selanjutnya.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan pengujian implementasi rangkaian *Quadratic Boost Converter*, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Rangkaian *Quadratic Boost Converter* pada tugas akhir ini memiliki rasio konversi yang tinggi. Pada implementasi alat didapat rasio konversi 4,7 hingga 10 kali.
2. Konverter ini dapat bekerja pada rentang tegangan *input* dan daya keluaran yang lebar. Pada pengujian alat hasil implementasi, konverter dapat mempertahankan tegangan pada nilai 400 volt untuk rentang tegangan input 40 volt hingga 68 volt dan rentang daya antara 40 watt hingga 106,67 watt.
3. Konverter akan mengalami error konversi yang tinggi ketika *duty cycle* lebih besar dari 50%. Error tertinggi terjadi ketika *duty cycle* 75% dengan nilai error 18,281%.
4. Efisiensi tertinggi pada implementasi alat dicapai saat pembebanan minimal dan tegangan input maksimal. Efisiensi terendah terjadi ketika pembebanan maksimal dan tegangan input minimal. Dari hasil pengujian didapatkan efisiensi tertinggi sebesar 88,16% dan efisiensi terendah 72,07%.

5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk perkembangan penelitian selanjutnya adalah:

1. Dirancang kemampuan daya maksimal konverter hingga 320 watt sehingga sesuai dengan daya maksimal *PV Array* yang digunakan.
2. Ditambahkan metode *softswitching* untuk mengurangi rugi-rugi pensakelaran sehingga efisiensi konverter dapat ditingkatkan.
3. Dalam melakukan perancangan, memperhatikan manajemen panas pada setiap komponen dan juga *spacing* antar komponen sehingga penurunan kinerja komponen dapat dihindari dan juga *parasitic*

component dapat berkurang dengan tanpa menyebabkan *Electromagnetic Intereference* (EMI) yang tinggi pada rangkaian.

4. Digunakan sakelar semikonduktor dengan spesifikasi arus yang lebih tinggi sehingga konverter dapat bekerja lebih optimal pada daya yang tinggi.
5. Ditambahkan rangkaian *snubber* dalam melakukan perancangan dan implementasi konverter sehingga bentuk gelombang dan performa dari konverter lebih optimal.

LAMPIRAN

Listing program Arduino Mega 2560 untuk membangkitkan sinyal PWM dengan frekuensi 50 kHz dan dengan *Duty Cycle* yang dapat diubah-ubah secara manual.

```
*****
#include <LiquidCrystal.h>
#include <PWM.h>
LiquidCrystal lcd(21, 20, 19, 18, 17, 16);
const int BUTTON = 6;
const int BUTTON1 = 7;
int led = 9;
int brightness = 0;
int i = 1;
int val = 0;
int val_old = 0;
int val1 = 0;
int val_old1 = 0;
float duty = 0.000000;
float pengali = 0.000000;
int32_t frequency = 50000;

void setup(){
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.print("Welcome to the ");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Quadratic Boost");
  delay(2000);
  lcd.clear();
  InitTimersSafe();
  bool success = SetPinFrequencySafe(led, frequency);
  if(success){
    pinMode(13, OUTPUT);
    digitalWrite(13, HIGH);
    pinMode(BUTTON, INPUT);
    pinMode(BUTTON1, INPUT);}}

void loop(){
```

```

val = digitalRead(BUTTON);
if((val==HIGH)&&(val_old==LOW)){
    brightness = brightness + i;
    delay(10);}
val1 = digitalRead(BUTTON1);
if((val1==HIGH)&&(val_old1==LOW)){
    brightness = brightness - i;
    delay(10);}
val_old = val;
val_old1 = val1;
pengali = float(brightness);
duty = pengali/255.000000;
pwmWrite(led, brightness);
delay(30);
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Duty = ");
lcd.setCursor(7,0);
lcd.print(duty, 6);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Freq = ");
lcd.setCursor(7,1);
lcd.print(frequency);}

```

Berikut adalah *Listing* program pembangkit gelombang PWM dengan controller *Proportional – Integral* untuk mode operasi konverter close loop dengan tegangan keluaran 400 volt.

```

*****
#include <LiquidCrystal.h>
#include <PWM.h>

LiquidCrystal lcd(21, 20, 19, 18, 17, 16);
int pin = 9;

float setpoint = 203.286;
float input = 0.0;
float err = 203.286;
float KeluarPWM = 0.0;
float OutP = 0.0;

```

```

float OutI = 0.0;

float Kp = 0.039;
float integ = 0.0;
float Ki = 0.1;
int32_t frequency = 50000;

void setup(){
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.print("Welcome to the ");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Quadratic Boost");
  delay(2000);
  lcd.clear();
  InitTimersSafe();
  bool success = SetPinFrequencySafe(pin, frequency);
  if(success){
    pinMode(13, OUTPUT);
    digitalWrite(13, HIGH);}}

void loop(){
  input = map (analogRead(A0), 0, 1024, 0, 255); // PI start here
  err = setpoint - input;
  integ+= err*0.05;
  KeluarPWM = Kp*err + Ki*integ; //PI resulting duty

  if(integ > 2000.0){
    integ = 2000.0;}
  if(KeluarPWM < 127.5){
    KeluarPWM = 127.5;}
  if(KeluarPWM > 186.15){
    KeluarPWM = 186.15;} //limit the duty value
  pwmWrite(pin, KeluarPWM); //duty generation to pin

  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("D= ");
  lcd.setCursor(3,0);
  lcd.print(KeluarPWM/255.0);
  lcd.setCursor(9,0);

```

```
lcd.print(integ);  
lcd.setCursor(0,1);  
lcd.print("Err= ");  
lcd.setCursor(5,1);  
lcd.print(err);  
lcd.setCursor(9,1);  
lcd.print("in= ");  
lcd.setCursor(12,1);  
lcd.print(input);}
```

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Muhammad Adhijaya Saputra lahir di Pekalongan, Jawa Tengah pada tanggal 10 Februari 1993. Penulis merupakan anak ketiga dari empat bersaudara dari pasangan Joyoharto dan Nerna Eva. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN Kuripan Lor 1, Pekalongan tahun 1999-2005, SMPN 6 Pekalongan tahun 2005-2008 dan lulus dari SMAN 1 Pekalongan pada tahun 2011. Selama masa studi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS), penulis mengikuti berbagai kegiatan kemahasiswaan seperti Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro ITS dan Unit Kegiatan Mahasiswa Tae Kwon Do ITS. Selain itu penulis juga aktif sebagai asisten praktikum di laboratorium Konvversi Energi Elektrik Teknik Elektro ITS.

e-mail: junofsyn@gmail.com

--Halaman ini sengaja dikosongkan--